

# تاریخ صنعت و اختراع

جلد چهارم  
تکنیکهای تمدن صنعتی  
انرژی و مواد

به کوشش  
موریس دوما و گروهی از کارشناسان

مقدمه از: موریس دوما

ترجمه عبدالله ارگانی

# تاریخ صنعت و اختراع





# تاریخ صنعت و اختراع

جلد چهارم

تکنیکهای تمدن صنعتی

انرژی و مواد

به کوشش

موريس دوما و گروهی از کارشناسان

مقدمه از: موريس دوما

ترجمه عبدالله ارگانی



مؤسسه انتشارات امیرکبیر

تهران، ۱۳۷۸



Dumas, Maurice

تاریخ صنعت و اختراع / اثر گروهی کارشناسان؛ ویراستار موریس دوما؛ ترجمه عبدالله ارگانی. - تهران: امیرکبیر، ۱۳۶۲ - ۱۳۷۸.  
 ۵ ج. : مصور، عکس.  
 ۱۴۰۰۰ ریال (دوره ۵ جلدی).

ISBN 964-00-0107-4 (دوره ۵ جلدی).

ISBN 964-00-0427-8 (ج. ۱) - ISBN 964-00-0428-6 (ج. ۲) - ISBN 964-00-0429-4 (ج. ۳).

ISBN 964-00-0430-8 (ج. ۴) - ISBN 964-00-0431-6 (ج. ۵)

فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیپا.

History generale des

techniques = A history of technology &amp; invention ...

عنوان اصلی:

کتابنامه.

مفردجات: ج. ۱. مبانی تمدن صنعتی - ج. ۲. مراحل نخستین ماشینیسیم - ج. ۳. پیشرفت ماشینیسیم - ج. ۴. تکنیکهای تمدن صنعتی: انرژی و مواد - ج. ۵. تکنیکهای تمدن صنعتی: تغییر شکل ارتباطات عامل انسانی.  
 ج. ۱۰ (چاپ دوم: ۱۳۷۸)، ج. ۵، ۴، ۳، ۲ (چاپ اول: ۱۳۷۸).  
 ۱. تکنولوژی - تاریخ. ۲. صنعت - تاریخ. ۳. اختراعات - تاریخ. الف. ارگانی، عبدالله،  
 ۱۳۰۲ - مترجم. ب. عنوان.  
 ۶۰۹ T ۱۵ / د ۹  
 ۱۳۶۲

۳۱۰۲ - ۶۴م

کتابخانه ملی ایران



تاریخ صنعت و اختراع (جلد چهارم)

به کوشش موریس دوما و گروهی از کارشناسان

مقدمه از: موریس دوما

ترجمه عبدالله ارگانی

چاپ اول: ۱۳۷۸

آماده سازی: واحد تولید امیرکبیر

چاپ و صحافی: چاپخانه سپهر، تهران

تیراژ: ۱۵۰۰ نسخه

حق چاپ محفوظ است.

ISBN 964-00-0107-4 (5vol.set)

ISBN 964-00-0430-8 (vol.4)

شابک ۹۶۴-۰۰-۰۱۰۷-۴ (دوره ۵ جلدی)

شابک ۹۶۴-۰۰-۰۴۳۰-۸ (جلد چهارم)

مؤسسه انتشارات امیرکبیر تهران، خیابان بهارستان پلاک ۴۸۹

## فهرست

صفحه	عنوان
۹	پیشگفتار
بخش اول	
تولید انرژی	
۳۲	ماشینها و توربینهای بخار
۲۰۱	موتورهای هوایی
۲۰۹	موتورهای درونسوز
۳۱۵	انرژی هسته‌ای
بخش دوم	
۳۹۶	حرکت به‌سوی برق صنعتی
۴۲۵	نوآوری برق صنعتی
۴۵۹	جریان متناوب
۴۹۱	کاربردهای بی‌درنگ جریان برق
۵۳۹	گسترش بزرگ سده بیستم



بخش سوم  
صنایع بزرگ شیمیایی

۶۰۰	تحول روشهای کلاسیک
۶۶۹	بهکار بردن مواد آلی طبیعی
۶۹۹	دانش و تکنیک شیمی
۷۰۹	وسایل فیزیکی صنایع شیمیایی
۷۵۳	صنعت نوین نیتروژن
۷۷۷	مواد مصنوعی در فراورده‌های سنتز

## پیشگفتار

مجلدهای چهارم و پنجم این اثر، وظیفه دارند چگونگی پیدایش تکنیکهایی را روشن کنند که پایه‌های اساسی شکوفایی تمدن صنعتی را در برهه‌ای از زمان تشکیل داده‌اند، که از یک سده فراتر می‌رود و بلافاصله پیش از عصر ماست. باید پذیرفت که این کار وظیفه ساده‌ای نیست و در آینده با دشواریهای فراوان برخورد خواهد داشت. در آغاز شایسته است که ویژگیهای اساسی این دو مجلد را باز نماییم و تلقی خود را از آنها مشخص سازیم.

در گذشته، طی پیشگفتارهای مجلدهای پیشین گفته شد که چرا طی این گفتارها، ما بر آن بوده‌ایم که در بررسی خود، عوامل بیگانه از قلمرو صنعت را، هرچند هم که به نوبه خود مهم هستند نادیده‌انگاریم، در دورانی که صنعت طی آن تا این اندازه اهمیت یافته است نمی‌بایست که خود تاریخ آن ناشناخته بماند. اما توافق بر روی محتویات آن هم، کار چندان ساده‌ای نیست زیرا این محتویات آن‌طور که بایست مشخص نشده‌اند و در واقع دستخوش انحرافات بوده‌اند که ناشی از پیشرفت سریع تاریخ اقتصادی و نیز تاریخ اجتماعی دهه‌های اخیر بوده است. تاریخ دیگری نوشته شده است که تلفیقهای مهمی از این دو در آن وجود دارد و بر بیشترین تعداد ممکن حوادث اقتصادی و اجتماعی شناخته و بررسی شده متکی است. این تاریخ با نادیده گرفتن حوادث مجرد سیاسی و نظامی - که در گذشته تنها موضوعات مورد بررسی در تاریخ را تشکیل می‌دادند - به شرایط زندگی توده‌های مردم روی آورده و به جنبه‌های گوناگون تمدن بیشتر پرداخته است. تاریخ‌نویسان که خود را وقف بررسی این زمینه پهن‌آور می‌کنند طبیعتاً با تکنیک روبه‌رو خواهند



شد، چنین برخوردی تقریباً برای همهٔ دورانهای مورد بررسی و بویژه برای سده‌های نوزدهم و بیستم پیش خواهد آمد. این نوع رویکردها که توجه به اقتصاد، نه جامعه‌شناسی، بر آن تسلط دارد ناگزیر تاریخ تکنیک را هم «شامل» می‌شود. طبیعی است که با این رویکرد، تاریخ تکنیک، شاخه‌ای از تاریخ اقتصادی و اجتماعی خواهد بود و با چنین دیدی، این تاریخ، تنها جنبه‌هایی از واقعیت را باز می‌نماید که ضمن بررسی مطرح می‌شوند و ناگزیر باید بدانها پرداخت و از کنار مباحثی که محتوی آنها، هنوز کاملاً معلوم نشده است گذر کرد.

در سال ۱۹۳۵ آقای لوسین فور بخوبی متوجه اهمیت این جای خالی شد و به لزوم پر کردن آن پیش از هر اقدام دیگری برای تدوین تاریخ صنعت در یک تاریخ عمومی پی برد. وی در برابر این پرسش که: «موضوع تاریخ تکنیک چیست؟» در سه بخش به‌طور اجمالی بدان پاسخ داد: نخست، بجاست که از تکنیکها «آثار تکنسین‌ها، وجود خطاهای ناشی از شرایط کار، اشتباهات جبری، ناآشنایی کامل آنها از شرایط کلی یک تولید»، یک تاریخ صنعت تدوین کنیم. دوم، ارزیابی «سهم علم در اختراع صنعتی (و) تأثیر اختراع صنعتی در ردیفی از حقایق علمی است. با حصول این شرایط، تنها چیزی که می‌ماند این است که کوشش صنعتی را در ردیف دیگر فعالیتهای بشری جای دهیم.

تاریخ و تکنسین: آقای لوسین فور ادامه می‌دهد که: مجموعهٔ این سه بخش، تاریخ صنایع را تشکیل می‌دهد و معین می‌کند که برای نوشتن هریک از آنها چه شرایطی باید مهیا و چگونه مدون گردند. مثلاً، برای بخش نخست می‌افزاید: «کار تکنسین به زمان و سرزمین وی محدود نمی‌ماند». بدین ترتیب، به انجام رساندن این بخش با موانعی برخورد می‌کند که گذشتن از آنها بسیار دشوار است. باید از خود پرسید که آیا توصیهٔ آقای فور دربارهٔ مصنوع تکنسین می‌تواند دنبال شود؟ باید پذیرفت که تأثیر این اسلوب هنوز بسیار محدود است. در دوران ما از «همه‌چیزدانان» علم و صنعت، دیگر خبری نیست، هیچ رشته‌ای بدون کارشناسی بالا وجود خارجی نخواهد داشت چنین کارشناسانی فرصتی برای مطالعهٔ تاریخ رشتهٔ تخصصی خود ندارند. چنانچه فرصتی برای شرکت در کنفرانس یا خواندن مقاله‌ای در این باره به‌دست آورند تنها چند اطلاع پیش‌با افتاده و گاهی هم معلومات مورد تردید از دورانهای پیشین بدانها تلقین می‌شود؛ و غالباً کنفرانس یا مقاله‌ای با ذکر چند داستان مهیج را به‌عنوان چاشنی به‌همراه دارد که انسان از بی‌خبری عمومی تکنسینها نسبت به تاریخ صنعت متعجب می‌شود. به عقیدهٔ آنان جهان صنعت که با شرکت آنها ساخته شده است آبشخور در گذشته‌ای نسبتاً مبهم دارد و به دوران اسلاف بلافصل آنها محدود می‌شود، کسانی که

با نام آنها در جوانی آشنا شده‌اند، از آن دورتر را با تجمع و قدری شوخی برگزار می‌کنند. جایگیری تحول تاریخی یک رشته تخصصی در حرکت کلی تاریخ تکنیک نیز به همین ترتیب صورت می‌گیرد، صنعتگر با زحمت با رشته تخصصی خود آشنا می‌شود و از پهنه دامنه آن هیچ خبر ندارد. در حال حاضر، صنعتگری که برحسب ضرورت به تخصصی بالا دست یافته است زندانی زمان و سرزمین خود است.

خوشبختانه استثنایی وجود دارد که بیشتر به استعدادهای فطری اشخاص وابسته است تا به شرایط پرورش حرفه‌ای آنها؛ محتوای این اثر گواه آشکار این امر است. مطلبی که باقی می‌ماند ذکر این نکته است که پیشرفتهای دانش ما درباره تاریخ تکنیک از کمبود شمار پژوهشگران رنج می‌برد. چگونه ممکن است صنعتگرانی از پیشه پول‌ساز خود دست بشویند درحالی که اطمینانی نیست که رشته تاریخ‌نویسی در هیچ‌کجا، حرفه‌ای پردرآمد باشد. اما، به هر حال، بین تاریخ‌نویسان و صنعتگران باید نوعی همکاری وجود داشته باشد و تنها این همکاری است که می‌تواند نخستین گام را در راه انجام برنامه آقای لوسین فور به پیش بردارد. می‌گویند که یک تاریخ‌نویس کاملاً آگاه چنانچه با محافل ذیربط سروکار داشته باشد مفاهیم علمی و صنعتی لازم برای تدوین تاریخ تکنیک را بسیار آسانتر از تکنسینی به‌دست می‌آورد که می‌خواهد همین اطلاعات تاریخی را برای رشته تخصصی خود گرد آورد. گرچه متأسفانه توان درک یک مورخ برای حل‌اجی دوره‌های کنونی صنعت، به‌علت سطح علمی بالای مبانی تکنولوژی اخیر، بسیار ضعیف است. همکاری تاریخ‌نویس و صنعتگر، امری است ناگزیر؛ و اکنون در مقیاسی محدود اما کافی برای اینکه تاریخ‌نویس سردرگم و دچار تشمت نشود، وجود دارد.

ازدحام و کمبود منابع: اگر نواقص کمی و کیفی اشخاص فرضاً برطرف شوند باز نقص دیگری می‌ماند که اهمیت آن کم نیست. مسأله به فراوانی منابع همراه با کمبود ناراحت‌کننده آنها مربوط می‌شود. هرکس می‌داند که نوشتارهای علمی و صنعتی طی دهه‌های اخیر چنان فراوان شده‌اند که هیچ شخص حرفه‌ای نمی‌تواند همه انتشارات مربوط به حرفه تخصصی خود را بخواند! اما کمتر کسی می‌داند که این فراوانی پدیده تازه‌ای نیست. حتی در آغاز همین دوره مورد بحث ما، تاریخ‌نویس خود را در برابر مقادیر بسیار زیاد منابع می‌یافت و با گذشت زمان به حجم آن افزوده می‌شد. این گرچه منحصر به تاریخ صنعت نیست، در این رشته، حجمی استثنایی دارد. بنابراین، نه‌تنها نمی‌توان بر همه این نوشته‌ها وقوف یافت بلکه مخصوصاً گزینش از میان این انبوه اطلاعات، که در فصلهای گوناگون، مقالات، نوشته‌ها و نیز در مدارک بایگانی شده‌ای که بدون استفاده مانده‌اند



مندرج هستند بسیار دشوار است. دور ریختن همه این توده بدون استفاده درست نیست. شمار زیادی از آنها برای آشنا شدن با محیطی که صنعت معینی را به وجود آورده مفید است. گاهی تعدادی از تکنیکها، پس از اینکه مدتها بلااستفاده می‌مانند، در اوضاع و احوال جدیدی بسرعت به پیش می‌روند.

در دل این شبکه متراکم، بتدریج که به زمان حاضر نزدیک می‌شویم، خطر این کمبودها بیشتر احساس می‌شود. نخست، حجم عظیم پرونده‌های مؤسسات است مؤسساتی که بایگانی آنها، هرگز طبقه‌بندی نشده‌اند، هر پژوهشگر تاریخ صنعت می‌داند که در کار ثبت اختراعات، خصلت درازگویی و لاف و گراف، بسیار است. زمانی که مؤسسات صنعتی نوعی ثبات دست یافتند - یعنی از نیمه دوم سده نوزدهم - این میل در آنها ایجاد شد که اختراعات تکمیل نشده‌ای را به ثبت برسانند، شاید برای اینکه از رقیب احتمالی پیشی گیرند و نیز بخاطر اینکه امکانات محتمل را پوشش دهند. انشای ثبت اختراعات تمام شده با احتیاط بسیار انجام می‌گرفت تا چگونگی ماشین یا روش اختراعی به اندازه کافی مبهم بماند.

متن مقالات مجلات و نیز متون سنگینتر غالباً بوسیله نویسندگان آنها به سابقه‌ی جانب‌داری دستخوش نوعی انحراف عمدی یا اتفاقی، از نظر حقیقت تاریخی می‌شد. مؤسسات بزرگی که کالاهایی در مقیاس صنعتی تولید می‌کردند سعی داشتند که همه‌چیز برملا نشود، و بسیاری از آنها که از نظر مالی بسیار قدرتمند شده بودند در تدوین تاریخی از صنعت، که به اشاره آنها نوشته می‌شد، منافع خود را در نظر می‌گرفتند.

از سوی دیگر، بویژه از زمان جنگ جهانی دوم به بعد، سایه اسرار نظامی بر روی بخشهای بیش از پیش گسترده اطلاعات علمی و فنی، سنگینی می‌کند.

همکاری یعنی چه؟ قسمت دوم تاریخ صنعتی که آقای لوسین فوربدان اشاره دارد درباره مناسبات علم و فن، یعنی تاریخ علم و تاریخ صنعت سخن می‌گوید. یقین است که نویسندگان تاریخ علم در جریان سه دهه اخیر همکاری ارزشمندی با نویسندگان تاریخ صنعت داشته‌اند. این کار در مورد صناعی انجام گرفته است که پیشرفت آنها بستگی کامل به محتویات علمیشان داشته است. اما باید کاملاً پذیرفت که برای دوره‌های پیش، تقریباً تا میانه سده بیستم، تاریخ علم برای تاریخ صنعت، اگر زبانی نداشته، چندان سودبخش هم نبوده است. این تاریخ، بیشتر به اعتبار دادن به رأی مشهوری نظر دارد که پیشرفت صنعت را همواره طی سده‌های متوالی به فرمان علم می‌داند - رأیی که برخلاف واقعیت است. در این دو مجلد باقی مانده و نیز در مجلدهای پیشین،

نمونه‌های بسیاری وجود دارد که خلاف این مفهوم رایج را ثابت می‌کنند، مانند: موتورهای حرارتی، برق صنعتی، رادیو، الکتریسیته و ...

بی‌شبهه این تفکر ریشه در تأخر بعضی از رشته‌ها صنعتی نسبت به علم مربوط به آنها دارد. تاریخ صنعت برای ارائه یک تحلیل شایسته ناتوان است.

بالاخره، باید گفت که این استاد بزرگ مکتب فعلی تاریخ در فرانسه، در حال ترکیب این دو رشته، اکیداً خاطرنشان کرده است که در تألیف تاریخ صنعت «مقتضی است که تکسینهای کنجکاو در صنعت خود و تاریخ آن با دانشمندانی که تاریخ علم رشته آنها را می‌دانند و نیز مورخانی به معنای دقیق کلمه - مورخانی با نگرش تلفیقی - همگی با این احساس که کار خود را ناقص و بدون نتیجه می‌دانند و خود را ناگزیر از همکاری نزدیک با یکدیگر می‌بینند به صورت گروهی دست به کار شوند». او می‌افزاید: «اما معنی همکاری چیست؟» پاسخ آن چنین است: «همکاری درباره مسئله مورد بررسی و اینکه هریک از همکاران باید درحالی که رشته خود را مطالعه می‌کند موظف باشد که نتایج به دست آمده و نظراتی را که برپایه آن نتایج حاصل می‌شوند با نتایج و اندیشه‌هایی که در همین شرایط همکاران آنها به دست آورده‌اند مقابله کند».

با فرض پذیرفتن این امر که میل به همکاری در همه پژوهشگران نمایان است، دو طرف باید بتوانند دستاوردهایی برابر با یکدیگر مبادله کنند. بنابراین، همان طور که گفتیم، در دهه‌های اخیر، تاریخ اقتصادی و اجتماعی پیشرفت چشمگیری داشته است - پیشرفتی با جنبه‌های گوناگون. همکاری در اطراف این رشته پژوهشی به اشکال مختلف ایجاد شده است. نوشتارهای مربوط به تاریخ اقتصادی و اجتماعی فرانسه زیر نظر استادان عالیدری نظیر فرنان برودل<sup>۱</sup> و ارنست لابروس<sup>۲</sup> گواه روشن این همکاری هستند. تاریخ علم هم در همین زمان در این راستا فعال بوده - گرچه دستاوردهای آن در فرانسه، از حرکت کلی، کمی عقب مانده است.

بی‌شبهه این شریک سوم است که لنگ می‌زند، زیرا مجموع اطلاعاتی که ارائه می‌کند برای ایجاد یقین در شنوندگان آنها بسیار ناکافی است.

ترازنامه اطلاعات ما: اثر حاضر این ادعا را ندارد که به تنهایی این کمبود را جبران می‌کند. هدف آن به دست دادن تراز از اطلاعات کنونی ما درباره آن فعالیت فکری بشر است که در حال حاضر از نتایج و تأثیرات آن نتایج، همگان اطلاع دارند. با ترتیب دادن فهرستی از دانسته‌ها و نادانسته‌ها می‌خواهند برای تاریخ تکنیک، در سست‌ترین بخش آن، پایه‌های بسیار مستحکمی بگذارند. پیشرفت آن را در این نیم سده تسهیل کنند. بنابراین، زمان آن رسیده است که همگی به

دعوت آقای لوسین فور در این همکاری شرکت کنیم.

چنانچه رشته‌های دیگر فعالیت بشری محیط بر او را نادیده بگیریم، آشکارا بدین نتیجه می‌رسیم که تاریخ تکنیک را نمی‌توان تاریخ اختراعات دانست بلکه باید آن را تاریخ آفرینندگی تکنیک نامید. محقق است که این آفرینش زمانی انجام می‌گیرد که عوامل خارجی آن را برانگیزند؛ تقاضای بازار، امکان سرمایه‌گذاری و توسعه صنعتی، موقعیتهای مناسب سیاسی و نظامی، دسترسی به یک سطح مناسب تکنیکی و غیره وجود داشته باشد. معمولاً گرایش به سوی قلب تکنیک برای این است تا هرچه بیشتر به چگونگی فرآیند خود آفرینش تکنیکی آشناتر شوند. در دوره‌ای که مورد بررسی مجله‌های چهارم و پنجم این مجموعه است، بتدریج که وقایع تکنیکی پیچیده می‌شوند، این دید اکتشافی بیشتر راهگشای ما خواهد بود.

نکته دیگری که باید یادآوری شود این است که به علت گوناگونی فراوان جنبه‌های تاریخ صنعت، تهیه طرحی که همه آنها را در یک کل متجسم کند ممکن نیست. در محدوده یک کتاب تنها، که در پنج مجلد خلاصه شده است - و در طرح اولیه قرار بود تنها در دو جلد مدون شود - بررسی عوامل خارج از تکنیک میسر نیست، مگر اینکه بخش بزرگی از تحلیلهای مربوطه فدا شود. چنانچه تصمیم دیگری اتخاذ شود، کاری که می‌تواند انجام گیرد چنان فشرده و محدود خواهد بود که اهمیت کار از دست خواهد رفت، و نیز ویراستار دیگری باید برگزیده شود.

سطح آفرینندگی: صنعت، با گذشت زمان پیش از پیش پیچیده شده است. با اینکه فرآیندهای تولیدی بسیار پیشرفته‌اند، منطق عمل حکم می‌کند که جای خود را به فراورده‌های سنجیده‌تری واگذارند. انگیزه تلاشهایی که برای پیشرفت کارها انجام می‌گیرند این است که با ابداع تکنیکی، تولید را یا افزایش دهند یا آن را در مسیر دیگری هدایت کنند. اما روشن است که راه انداختن یک فرآیند تولیدی پیشرفته‌تر، مستلزم طرح تجهیزات جدیدی است که از تجهیزات پیشین برتر باشند و به‌طور کلی پیچیدگی بسیار بیشتری - اگر نه در ساختار - در طرز کار داشته باشند. بدیهی است که پیشرفت در هر زمینه، همیشه به ارتقا در سطح بالاتری از خلاقیت وابسته است - خلاقیتی که از تحول تکنیک، پدیده‌ای را همراه با تنگناها، امکانات و فرآیند خاص آن می‌آفریند.

شاید این راه میانبری از سطح آفرینندگی است که در آینده بین تاریخ تکنیک و تاریخ اقتصادی و سیاسی رابطه‌ای برقرار خواهد ساخت. این مفهوم نه تنها شامل کیفیت وسایل صنعتی موجود می‌شود بلکه فشار نوآور یا مهارکننده و عوامل خارجی مؤثر بر تفکر تکنسین را هم دربر می‌گیرد. فعالیت و خودگردانی عامل اخیر، طی دورانهای مورد بررسی در مجله‌های پیشین روشن

شده‌اند. حتی می‌توان گفت که تأثیر این عامل همراه با پیشرفتهایی که پیایی و با آهنگ سنجیده‌تر تحول انجام می‌گیرند قطعیت خواهد شد. دربارهٔ تأثیر عامل خارجی در دوران معاصر مورد بررسی ما، تردیدهایی دیده می‌شود زیرا تأثیر رویدادهای اقتصادی و سیاسی بیشتر محسوس شده‌اند. آیا می‌توان گفت که تنها تحرک خارجی، تحول تکنیک را سبب می‌شود؟ یا اینکه آفرینندگی تکنیک انگیزهٔ فعالیت اقتصادی است زیرا باید از نوآوریهای تازه سود جست؟ این برهان دوجانبه‌ای است که شاید به علت نداشتن دلایل کافی به جایی نرسد، و شاید هم به قضیهٔ مرغ یا تخم مرغ، کدام یک اول بودند؟ شباهت بسیار دارد.

پیشگامان و پیشینه‌ها: از محتوای دو مجلد اخیر تاریخ صنعت و اختراع، دو نکته دقیقاً روشن می‌شود. نخست می‌توان گفت که مسألهٔ پیشگامان و پیشینه‌ها، چنانچه در آن تعمق شود، در مورد آفرینش تکنیک، مسألهٔ نادرستی است. اندیشه‌ای در یک مغز مبتکر خطوط می‌کشد، این اندیشه گاهی در یک اقدام پیش‌سرس جامه عمل می‌پوشد. اما این اقدام، هیچ نوع نوآوری به دنبال ندارد، زیرا وضع وسایل موجود صنعتی پیدایش یک مدل مفید را اجازه نمی‌دهد و یا اینکه چون تجهیزات صنعتی موجود پاسخگوی نیازهای عهد خویش هستند شوقی برای پیشبرد صنعت وجود ندارد. در این دو مجلد باقی‌مانده با نمونه‌های بسیار جالبی از این موارد برخورد می‌کنیم. از جمله آنها اندیشه‌های نخستین دربارهٔ موتورهای درونسوز فیلیپ لوبون یا طرحهای برادران نیپس (کلود ونیسفور) در مورد کارهای چارلز بیچ برای ساختن یک ماشین آنالیتیکی الکترومکانیکی است. داستان موتور با هوای گرم نیز بسیار جالب توجه است. این موتور، گرچه در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم بوسیلهٔ استرلینگ<sup>۱</sup> طرح‌ریزی شد، تنها در نیمهٔ دوم سدهٔ ما به کار گرفته شد. درست است که در این فاصلهٔ زمانی، موتورهای حرارتی و بعد برقی به طور گسترده‌ای رواج یافتند. موتور با هوای گرم، تا زمانی که زیر دریایی و سفینه‌های فضایی ساخته نشده بودند به صورت صنعت ناآشنایی بدون استفاده مانده بود؛ و نیز گویا لازم بود که مسألهٔ وسایل مبادله‌گر ما راه حل تازه‌ای بیابد.

صنایع ناآشنای چشم به راه زمانهای دور، در این دوره کم نبودند. مولدهای برق مدت نیم سده در انتظار ماندند تا اینکه آهنرباهای دائمی جای خود را به مغناطیسهای برقی واگذارند که از زمان پیدایش الکترومغناطیس شناخته شده بودند. صنعت ناآشنای دیگری که توربین بخار است همین مدت را در انتظار ماند، زیرا جهان صنعت و اقتصاد هیچ لزومی به تقویت موتورهایی که با سرعت زیاد بگردند نمی‌دید؛ و نیز مسألهٔ کاربرد موتورهای نمی‌توانست حل شود. یکی دیگر از صنایع متروکه، (تلگراف بی‌سیم) با آشکارسازی بلورین است که مدت چند سال به طور تقنینی به کار می‌رفت،

سپس به مدت یک ربع قرن کنار گذاشته شد تا آنکه نیرساناها به صنعت الکترونیک راه یافتند. پیشینه‌ها در مواردی اهمیت تاریخی بسیار داشته‌اند، که از آن میان می‌توان از اختراع نیکولاوس آوگوست اوتو با موتور چهار زمانی او نام برد که در فرانسه به توسط نشریه مشهور Beau de Rochas پانزده سال پیش از آن، برای همیشه متروکه اعلام شده بود. کمی بعد موتورهای ساخت کلمان آده که تنها به کمک باد از زمین برمی‌خاستند، دعوی برادران رایت را که می‌خواستند امتیاز همه وسایل مربوط به پرواز در فرانسه به آنها داده شود به شکست کشانید. در زمان بسیار اخیرتری در زمینه دیگری تراست آلمانی: IG Farben Industrie روش هیدروژندهی کاتالیزگری اسیدهای چرب را به علت لغو اختراع ثبت شده‌ای که شامل این روش شیمیایی بود توسعه داد. علت لغو آن اختراع این بود که آقایان بو و بلان، شیمیدانان فرانسوی، قبلاً آن را به‌طور آزمایشگاهی تهیه کرده و کار خود را نیز انتشار داده بودند.

آفرینش تکنیک و تصادفات: نوآوریهای بزرگ تنها در یک محیط صنعتی مناسب می‌توانند رشد و نمو کنند؛ اما در چنین محیطی هم تفکر تکنسین سهم مهمی دارد و حتی گاهی عامل اصلی یک جهش است. روشن است که نیروی آفرینندگی وی کمتر تحت تأثیر حوادث اقتصادی قرار می‌گیرد. جالب توجه است که یک رشته نوآوریها که در چنین جامعه صنعتی تأثیر عمیقی داشته‌اند در دورانی از کساد طولانی و بحرانهای ادواری مهم طی سه دهه اخیر قرن حاضر پدید آمده‌اند: موتورهای بنزینی، موتورهای دیزلی، برق صنعتی، انتقال برق چند فاز، توربینهای بخار، استخراج آلومینیوم به روش الکترولیزی، ساخت فولادهای مخصوص و کاربرد ابزارهای تندبر در دستگاههای تراش رولوری، رنگهای سنتزی و ... در همین دوران بود که نخستین صنایع اتومبیل‌سازی پدید آمدند و گامهای اولیه در ارتباطات رادیوالکتریسته و پرواز دستگاههای سنگینتر از هوا، برداشته شد. وانگهی در مرحله دیگری از صنعتی شدن جهان به سالهای ۳۰ همین سده برخورد می‌کنیم که از نظر کساد شدید دنیای سرمایه‌داری شهرت بسیار دارد. جهش تحقیقات صنعتی سالهای ۲۰ به اندازه لازم بررسی نشده است. این جهش با طرح و به کاراندازی کراکینگ (مولکول‌شکنی) نفت، سنتزهای بزرگ صنعتی بسیار (پلیمر)های وینیلی و آکریلی، نزدیک شدن به رادار، نخستین انتقالهای پیام بوسیله تلویزیون، برقراری روابط فضایی بین قاره‌ها، برداشتن گامهایی نخستین در ساختن ماشینهای حساب، که کمی بعد الکترونیکی شدند، ممتاز شده است.

محقق است که از این تصادفها نمی‌توان نتایج قطعی گرفت اما می‌توان بدانها ارج گذاشت و مورد بررسی و تحلیل قرار داد، و نیز شاید شایسته آن باشد تا از آنها تابلویی کاملتر از آنچه که در



اینجا آمده است داشته باشیم.

شکستهای تعادل: چون آفرینش تکنیک تا حدودی مستقل از تظاهر آن است، جا دارد از خود بپرسیم که عوامل درونی حاکم بر جریان تحولی آن کدامند؟ در این کتاب بر آن نیستیم که درباره این جنبه از تاریخ صنعت تحلیلی نظری داشته باشیم زیرا این کار از محدوده اطلاعات کنونی ما بیرون است. با وجود این، خواننده در بخشهای مختلف عناصری از این تحلیل را خواهد یافت. در گذشته با اوضاع و احوالی برخورد شده است که مجموعه وسایل صنعتی موجود در آنها چنان تعادلی داشته‌اند که هیچ‌گونه تحولی مشاهده نمی‌شد. در واقع، چنین ثباتی برای یک صنعت پیچیده، در کلیت جامع آن هرگز وجود نداشته است. اما این نیز هست که بارها در تکنیک معینی که مثلاً یک نوع صنعت را شامل می‌شود، این ثبات مشاهده شده است. در چنین حالتی نه تنها وسایل صنعتی دارای تعادل هستند، بلکه علاوه بر آن، هیچ عامل خارجی با خصلت تکنیکی، اقتصادی، اجتماعی یا سیاسی در برهم زدن این ثبات دخالتی نمی‌کنند. به عبارت دیگر، این تحول چنان آرام انجام می‌گیرد که ثابت می‌نماید. چنین ثباتی برای تعدادی از صنایع بزرگ سنتی که تا حدود نیمه سده هجدهم به اقتصاد خدمت می‌کردند، مشاهده شده است.

اما با تغییر شرایط، یک عامل خارجی موجب یک نوآوری برجسته‌ای می‌شود که تعادل این محیط تکنیکی را برهم می‌زند. در مجلد سوم این اثر، با یکی از این حوادث، که در سده هجدهم بسیار طبیعی و ساده می‌نمود برخورد کردیم. صنعت نساجی که در انگلستان تحت تأثیر ورود روزافزون غوزه قرار گرفته بود به نیازهای مصرف محلی و سپس صادرات پاسخ می‌گفت. تقاضا برای نخ بافندگی که با کاربرد ماسوره پرده افزایش می‌یافت فکر خلاقه کسانی را برای اختراع مکانیسمی که سرعت تولید را افزایش دهد برانگیخت. تعادل تکنیکی اولیه میان صنایع بافندگی و ریسندگی درهم ریخت و روی تکنیکهای بافندگی فشار آمد تا شکاف موجود بین این دو رشته اساسی این صنعت را پر کند. در همان زمان، فشار بر وسایل تولید مربوط به مرحله پس از ریسندگی، از جین یا حلاجی پنبه تا کاردینگ (شانه‌کشی) و فتیله‌سازی زیاد شد. تنشهای درونی صنعت نساجی زمانی روبه‌کاهش نهاد که در آغاز نیمه دوم سده نوزدهم تعادل تازه‌ای برقرار شده بود.

کارساختن و راه‌اندازی مکانیسمهای تازه، انگیزه پیدایش فشارهایی از نوع دیگر شد که این بار در زمینه‌های صنعتی دیگری اثر گذاردند. این فشارها هم در رشته تکنیکهای ماشین‌سازی و تکنیکهای آلیاژهای آهنی و هم در تولید انرژی بود که مقصد و منظور آنها بودند. زمانی که تولید صنعتی رنگها آغاز شد دامنه این فشارها به قسمت صنایع شیمیایی نیز راه یافت، تا آنجا که روش شیمیایی سفید

کردن پارچه‌ها پایه‌گذاری شد که بسیار سریعتر از روش سنتی در آفتاب گذاردن آنها عمل می‌کرد. در آهنکاری، به‌عنوان نمونه، می‌توان از کوره‌های بلند کک‌سوز نام برد که تولید چدن را افزایش داد. این نوآوری در داخل این حوضهٔ تکنیکی، انگیزهٔ پیدایش فشار روی روشهای تصفیهٔ چدن بود. این شکاف عریض با پیدایش روش بودلاژ (تهیهٔ آهن ورزیده) پر شد. با این حال، چند دهه پس از آن در زمینهٔ تهیهٔ فولاد تنگنای دیگری پدید آمد. این تنگنا که در آغاز سدهٔ زیاده نبود بتدریج و هنگامی بیشتر محسوس می‌شد که ساخت ماشین‌ابزار گسترش می‌یافت. لوکوموتیوها و ریلها ساخته می‌شد؛ ساختمانهای اسکلت فلزی، پلها و کشتیها برپا می‌شدند؛ و نیز لزوم زره‌پوش کردن ماشینهای جنگی در دهه‌های پایانی سدهٔ نوزدهم، و تولید گلوله‌های توپ و خمپاره‌ها افزایش می‌یافت. در بخش نخست مجلد پنجم دیده خواهد شد که چگونه تکنیکی که مانع را دور زد مسألهٔ کمبود فولاد را حل کرد. و این نخستین نمونه از فرایند دینامیسم تحول یکسان است که با تظاهرات متعدد آن برخورد خواهیم کرد. از آن میان روشهای تثبیت نیتروژن هوا، در آغاز سدهٔ بیستم و گذر از تکنیکهای الکترومغناطیسی به تکنیکهای الکترونیکی برای ساختن و تکمیل ماشینهای حساب، در تاریخ تکنیکهای معاصر، مراحل بسیار مهمی به‌شمار می‌روند.

تسلسل نژادی: آفرینش تکنیک معمولاً با تطبیق دادن نمونه‌ای که کاربرد کاملاً معینی دارد، با شرایط کاربرد تازه انجام می‌گیرد. می‌توان از جابه‌جا کردن مورفولوژی یک اختراع سخن گفت که انواع آن مبنای نسل کم‌وبیش طولی از اختراعات خواهند شد. همچنین می‌توان از انتقال دادن وظایف اصلی یک سیستم به چارچوب مورفولوژیکی دیگری سخن گفت که هنوز با آن سازگار نشده‌اند. در مورد نخستین نسل، نمونه‌ای را می‌توان در نظر گرفت؛ مثل اختراع ژان-لویی مونوری. مسألهٔ مربوط به موتورهای است که اساساً از یک القاگیر (روتور) و یک القاگر (استاتور) تشکیل شده‌اند. کهنترین شکل آنها چرخاب با محور عمودی است که می‌توان آن را در آثار ویتروویوس یافت و نمونه‌هایی از آن، سدهای مقابل آبهای زیاد با ارتفاع ریزش کم از همان زمانهای قدیم وجود داشتند. این نوع مورفولوژی را انواع گوناگون توربینهای آبی، از توربین ساخت فورنیرون تا توربین کاپلان رعایت کرده‌اند. نیازی به گفتن نیست که همهٔ این توربینها در این نژاد قرار دارند. دیده خواهد شد که توربین پلتنون از نظر مورفولوژی، جدای از این نژاد و به توربین بخاری لاوال نزدیکتر است. اما نژاد مورد نظر ما با توربینهای آبی پایان نمی‌گیرد، بلکه با تغییر مهمی در ساختار، بدون اینکه اتحاد روتور-استاتور به‌هم بخورد سرسلسلهٔ انواعی از توربو ماشینها می‌شود که توربینها بخاری نوع پارسنز (چارلز الجرنان) و توربینهای متعدد دیگر سپس توربین گازی و توربوآکتور از

آن جمله‌اند. تلمبه‌های آب، تلمبه‌های باد، و دمه‌های گردنده را می‌توان از همین نژاد دانست. در پایان در ساده‌ترین نوع این موتور، لاقل در خطوط کلی روتور حذف شده است و در استاتور آکورها و پولسور آکورها تنها استاتور باقی مانده است. خواهیم دید که این سلسله موتورها با بهره‌گیری از رشته دیگری از تحول، که از نوع کارکردی است، ادامه می‌یابد.

پیش از این، رواج یک نژاد مورفولوژیکی باید بررسی می‌شد و آن موتورهای پیستونی با حرکت رفت و برگشتی بود. این نژاد اساساً با تلمبه‌های آب آغاز می‌شود و با تلمبه‌های باد و دستگاه بادی فیزیکدانهای اواخر سده هفدهم و سده هجدهم ادامه می‌یابد. ماشین بخار نیوکمن مدت نسبتاً کوتاهی جای دستگاههای بالا را که مدت‌ها - حدود دو سده - در کار بودند اشغال کرد تا اینکه شکل موتور اولیه و درونسوز، موتورگازی معمولی، موتور بنزینی و موتور دیزلی، به اعتبار خصوصیات مورفولوژیکی اساسی خود تکثیر یافتند.

این سلسله، تنها با پیوند با جریانهای پیاپی و گوناگون توانست ادامه یابد. آب در آنها نقش محرک را نداشت و این وظیفه را انبساط بخار و دتانت آن عهده‌دار بود که جای خود را به گازهایی که در سیلندر می‌سوختند داد. این تسلسل نژادی کارکردی با تسلسل مورفولوژیکی در موتورهای گردان برخورد کرد و ثمره این برخورد در آن زمان نخست توربین بخاری و سپس توربین گازی بود. بدون شبهه علت پشت‌سرگذاری مراحل اخیر، نخست این بود که توانستند بخار متراکم را تولید و از آن استفاده کنند و سپس در سیلندری، مخلوط هوا و سوخت را مشتعل سازند و از آثار آن بهره‌گیرند. این مشاهدات متضمن این امر نیست که توالی زمانی دقیقی در این نوآوریها وجود داشته است، بلکه می‌توان گفت که دوره‌های تکامل آنها تقریباً در مجموع توالی داشته‌اند. اما زمانی که به پایان این تسلسل می‌رسیم. بنوعی واگرایی این پدیده مواجه می‌شویم و می‌بینیم که پیدایش توربورآکتور و استاتورآکتور و پولسورآکتور با یکدیگر همزمان می‌باشند.

در اینجا نمونه‌های دیگری از این تسلسل خانوادگی در تحول رشته‌های گوناگون تکنیک را ذکر نمی‌کنیم. از این نمونه‌ها تقریباً در همه زمینه‌ها دیده می‌شوند و ما نمی‌خواهیم اهمیت آنها را گوشزد کنیم. نتیجه‌ای که بی‌درنگ از این مقدمه به دست می‌آید این است که نوآوری در زمان خود آشکار می‌شود و لاقل زمانی که دستاورد تکنیکی، ساخت نمونه‌ای مؤثر را که پاسخگوی نیازهای مخفی یا آشکار سیستم اقتصادی حاکم باشد ممکن سازد.

تکنیکهای سیرشده تکنیکهای سیرناشده: مطلب را نوع دیگری نیز می‌توان بررسی کرد. سلسله‌هایی در نسلهایی از صنایع پدید می‌آیند که زندگی تکنیکی کم‌وبیش محدودی دارند. از میان آنهایی که

دیدهایم برخی کمالیابی خود را از دست می‌دهند و از نظر تکنیکی سیر شده هستند. آنها وظیفه خود را به طور کامل انجام می‌دهند، اما با وسایل در دسترس و گزارشهای تحولی، معلوم نیست چگونه ممکن است تغییر شکلهای اساسی و مفید در آنها ایجاد کرد. همه موتورهای پیستونی با حرکت رفت و برگشتی از نظر مکانیکی سیر شده هستند اما تعدادی از آنها بی‌مصرف شده‌اند. آنها دیگر به‌کار گرفته نمی‌شوند و در فرصتهای کوتاه یا متوسط زمانی، ظاهراً بختی ندارند که مورد استفاده قرار گیرند. ماشین بخار پیستونی بهترین نمونه است که نه تنها سیر بلکه برای همیشه بی‌مصرف شده است؛ درحالی که بقیه انواع موتورهای پیستونی، تلمبه‌ها و موتورهای درونسوز، گرچه سیر شده‌اند اما فعال می‌باشند.

همین امر برای تعدادی از دستگاههای گردان نیز صدق می‌کند. مثلاً تلمبه‌های آب و هوا، (دمها)، توربینهای بخاری نشان می‌دهند که تکنیکی سیر شده دارند، درحالی که هیچ‌یک از این دستگاهها را نمی‌توان بی‌مصرف به‌شمار آورد. در مقابل، بسیار محتمل است که توربین گازی که نتیجه برخورد یک تسلسل مورفولوژیکی با یک تسلسل کارکردی است، همان‌طور که در گذشته دیدیم تکنیک سیر نشده‌ای دارد. در این دو مجلد باقی‌مانده نمونه‌های دیگری از تکنیکهای سیر نشده خواهیم دید که دستگاههای الکترونیکی، شیمی مواد سازنده، تهیه و سنتز مواد زیستی از نمونه‌های جالب آن هستند. در زمینه‌های بسیار گوناگون، برای توصیف بیشتر این امر، ساخت وسایل بالابری و تعمیرات، ساخت سفینه‌های فضایی را به‌یاد می‌آوریم. اما در این موارد تکنیکهای پیچیده‌ای به‌کار رفته‌اند که در این مختصر نمی‌توان به تجزیه و تحلیل آنها پرداخت.

خلاقیت با واکنشهای زنجیری: برای اینکه به راه‌های بزرگ تحول بازگردیم و آخرین نمونه ساده شده را از آن به‌دست آوریم می‌بایست پدیده فشارهای متقابل بین گروه‌های تکنیکی مشخص را بررسی کنیم. این فشارها انگیزه واکنشهای زنجیری هستند که در اغلب موارد راست خطی نیستند و بتدریج که به دوران کنونی نزدیکتر می‌شویم شبکه آن پیچیده‌تر می‌شود. این واکنش را نمی‌توان همچون روش تسلسل نژادی که از آن سخن راندیم به کمک یک مورد تکنیکی یا سیستمی از کارکردهای روز توضیح داد. یک حادثه تکنیکی منبع صدور انگیزه‌هایی است که به‌طور فزاینده‌ای به‌سوی آماجهای گوناگون انتشار می‌یابد تا فرآیندی از نوآوری‌ها را در گروه‌های تکنیکی پدید آورند که با آنها روابط متقابل تأثیرگذاری دارند. این انگیزه می‌تواند یک حادثه اقتصادی هم باشد، مثل واردات پنبه به انگلستان و نیترات به فرانسه، یا نیاز روزافزون به ارتباطات و بارکشی سریع در سده‌های نوزدهم و بیستم، یا یک حادثه اجتماعی - همان‌طور که در مثال پیش دیدیم - یا از اواخر

سده نوزدهم، مهاجرت‌های متناوب و روزانه کارگران به مجتمع‌های بزرگ شهری. ما این پدیده واکنش زنجیری را تنها بر پایه انگیزه تکنیکی آن بررسی می‌کنیم. به عنوان نمونه، یک حادثه مهم، مثلاً اختراع دینام برگشت‌پذیر بوسیله گرام را در نظر بگیرید. ما برای ساده کردن مطلب، واکنشهایی را، که می‌توان آنها را جانی نامید ندیده می‌گیریم. این واکنشها با تکنیک تازه در یک سطح قرار می‌گیرند و تأثیراتی در تکنیکها اعمال می‌کنند که اساساً، بستگی به ساخت آن، مکانیک ابزار دقیق، تولید مسی با خلوص شیمیایی درخور سیمهای برق و غیره دارد. مورد آخر، بیشتر تابع تکامل مولدهای برق است.

این یک موردی است که در یک محیط تکنیکی معین متحول سر بر زده است. این مورد تحول مربوط به خود را خواهد یافت که نخستین مرحله آن، تولید جریان متناوب است. برای اینکه این جریان به یک فراورده اقتصادی تبدیل شود می‌بایست وسیله انتقال آن را یافت و این امر بدون آفرینش تجهیزات مربوطه، کابل‌های حامل، مقره‌ها، ترانسفورماتورها، دیژونکتورها و غیره عملی نیست. یکی از نخستین کاربردهای این جریان، پس از اینکه راه انتقال آن را یافتند تغذیه موتورهای در کارگاهها یا موتورهای کشنده است. برای استفاده بهتر از این نیروی محرکه، تکنیک ساخت موتورهای الکتریکی و تطبیق آنها با اشکال گوناگون جریان، هم برای موتورهای کارگاهها و هم برای موتورهای لوکوموتیو و تراموای آن را تکامل بخشیدند، که در مورد اخیر، در شبکه راه‌های آهن؛ انگیزه نوآوری‌هایی شد.

جریان برق که بدین ترتیب در دسترس قرار گرفت و لااقل به فواصل متوسطی انتقال می‌یافت دو کاربرد دیگری را همزمان با کاربرد ماشینهای استفاده‌کننده از نیروی محرکه، سبب شد. کارهای آزمایشگاهی سده نوزدهم، اثر ژول و الکترولیز را پدید آوردند. کوششها و موفقیتها در زمینه‌های این دو کاربرد، پیش از ساختن دینام بود (آبکاری برقی) و لامپهای قوسی حدود ده سال عمر داشتند. این وسایل، هنوز نارس و پرهزینه بودند. برق صنعتی پس از مدت کمی انگیزه روشنائی با لامپهای روشنائی و تهیه فلزات خالص از راه الکترولیز شد، که نخستین کاربرد آن، تهیه مس بود؛ سپس بنا بر اهمیتی که در آن روزگار داشت، برای تهیه آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفت استخراج فلزات قلیایی از راه الکترولیز کمی پس از آن عملی شد و برای صنایع شیمیایی تعدادی واکنشگر شیمیایی جدید و قوی را فراهم ساخت که در آن زمان بسیار باصرفه بود.

بدین ترتیب، پس از اختراع مولدهای برق و اختراع آقای گرام یک رشته واکنشهای زنجیری تحقق، و روزبه‌روز گسترش یافتند. وضع در بخش صنایع مادر هم بدین‌گونه بود. همین‌که دست

به‌کار ساختن آلترناتورهای بزرگ شدند، ماشین بخار کلاسیک پیستونی را ضعیف دیدند. پس از کوششی که برای تقویت آن انجام گرفت به‌طرف ماشینهای دیگر، نخست توربینهای بخار، سپس موتورهای دیزلی روی آوردند. لزوم تطبیق منابع انرژی با کار ماشینهایی که با سرعت زیاد می‌گردند تأثیر بسیار در تکمیل این ماشینها داشت. موتور دیگری ساخته شد و آن توربین آبی بود. دامنه کاربرد آن بزودی از دامنه کار موتورهای موجود فراتر رفت و تنوع مدلهای آن چنان بود که در آبشارهای بسیار گوناگون، می‌توانست به‌کار گرفته شود. این وضع، تکثیر منابع آبی را سبب شده نوآوریهای تازه در ساخت سدها در همه‌جاها پیاپی رخ نمودند و لزوم تجهیز آنها با وسایل جدید، شکوفایی بزرگی در کارگاهها پدید آورد.

تأثیر واکنشهای زنجیری بعدی به‌اندازه واکنشهای قبلی برای هر مورد تکنیکی، تعیین‌کننده است، و این نوع انتشار آفرینش تکنیکی منحصر به نمونه نسبتاً ساده‌ای که در اینجا بدان پرداختیم، نیست. بلکه برعکس، فرآیندی دارای خصلت عمومی است که بتدریج که در یک محیط تکنیکی بیش از پیش فشرده‌تر نفوذ می‌یابد پیچیده‌تر می‌شود. دیده می‌شود که این زنجیره‌ها انشعاباتی می‌یابند و این انشعابات کمک می‌کنند تا اثرات متقابل تحول گروه‌های تکنیکی گوناگون، تجزیه و تحلیل فرآیند پیشرفت فنی مجموعه را ممکن سازند. این پدیده که معاصران ما را تا این حد ناآرام ساخته است از نوعی منطق درونی مایه می‌گیرد که به تازگی حوادث سیاسی، نظامی، اقتصادی یا اجتماعی را آشفته کرده است. تنها آشفتنگی تحمیل شده بدان، سرعت دادن آهنگ نوآوریها در بعضی موقعیتهای بحرانی است. زمانی که مراحل تحول به تحریک یک حادثه بیرون از حوضه تکنیکی شروع می‌شوند عاملی که آهنگ پیشرفت را در همان ضرباهنگ پیشرفت موقعیت پیشین مهار کند وجود نخواهد داشت. «جهش به پیش»، عوامل تکنیکی تازه‌ای از تحول ایجاد خواهد کرد که فشار آنها بر فشارهای موجود افزوده خواهد شد تا مرحله جدید سرعت گرفتن کل زمینه تکنیک را به‌طور فزاینده‌ای افزایش دهند. این همان حالتی است که در پیامدهای دو جنگ سده بیستم دیده شد. هریک از آن جنگها به‌عنوان «نوعی از تمدن» این سده را تحت تأثیر قرار داد، بازارهای تازه‌ای گشوده شدند و تقاضای کالاهای پیشرفته با فوریت بسیار زیاد جهت مقاصد صرفاً جنگی همیشگی شد. به دنبال جنگ جهانی نخست، رشته‌های بسیار مطلوب عبارت بودند از: ساخت اتومبیل و هواپیما؛ تولید لامپهای ترموئودینامیک؛ تولید نخستین گروه فرآورده‌های شیمیایی. پس از جنگ دوم، مسأله از توربوآکتورها به بسپارهای وینیلی و آکریلی و آنتی‌بیوتیکها کشید، بدون اینکه از زمینه‌های دیگری سخن گوئیم که پیشرفت تکنیک در مورد آنها اگرچه درخشش رشته‌های

پیشین را نداشت در تحمیل آهنگ تازه تولید از جهت کمیت و تنوع، به همان اندازه مهم بود. انقلاب پیایی: به طور قطع با موشکافی در تحلیل دینامیک ویژه تحول تکنیکهاست که ما می‌توانیم موقع فوق‌العاده‌ای را که بشریت به چنگ آورده است درک کنیم. گاهی با اصطلاحات کنایی این موقع را تشریح می‌کنند که در داوری بوی سستی از آن استشمام می‌شود و به اضطرابی مبهم و کاملاً کسل‌کننده می‌انجامد. با پیش کشیدن فکر انقلابات پیایی می‌خواهند دشواری کار را منحرف سازند، اما با این کار نمی‌توان علل و محتوی را بیان کرد. در این جا درباره مفهوم انقلاب صنعتی و روابط آن با تاریخ صنعت، که در پیشگفتار مجلد سوم این اثر بررسی شدند، زیاد مکث نمی‌کنیم. شایسته نیست که زبان تاریخی اصطلاح انقلاب صنعتی را محو کنیم - اصطلاحی که در پی شرح و بیان آثار توأم عوامل بسیار گوناگون و نیز گذار یک تمدن سنتی به تمدنی دقیقاً صنعتی است. فراوانی نوشتارهای مربوطه، گویا مسأله را روشن نساخته است. زمانی که کلود فولن این پرسش را پیش می‌کشد که «انقلاب صنعتی چیست؟» و نمی‌تواند تردید خود را نسبت بدان پنهان کند و در پایان، خود بدان چنین پاسخ می‌دهد: اطلاعات ما درباره انقلاب صنعتی از ۲۵ سال پیش تا کنون بسیار زیادتر شده است (۱۹۷۱)، اما این افزایش اطلاعات در زمینه پیچیده بودن مسأله است نه در توافق روی توضیح کلی آن.» دیگر مورخان تاریخ تمدن کمتر آشتی‌پذیر می‌نمایند. آقای رنه شرب که درباره تاریخ تمدن سده نوزدهم کتابی دارد، و چنین اظهار عقیده می‌کند که «این به اصطلاح انقلاب صنعتی نه پیشتر از سال ۱۷۸۹ بوده است و نه دیرتر از سال ۱۸۱۵. طرفداران این اصطلاح، بر روی پیشرفتهای روزافزون در تکنیکهای تولید و حمل و نقل انگشت می‌گذارند؛ اما اینها اختراعاتی از سده هجدهم هستند که در آن زمان به ثمر نشستند.»

به عبارتی دیگر، اگر بپذیریم که انقلاب صنعتی در نیمه دوم سده هجدهم در انگلستان آغاز شد و آفرینندگی تکنیک بتدریج سرعت گرفت، می‌توان گفت که این انقلاب، پیوسته به راه خود ادامه می‌دهد و تنها پس از گذشت یک یا دو سده ممکن است به پایان خود نزدیک شود؛ مدت زمانی که در مقایسه با تاریخ چهار هزارساله تمدن شناخته شده ما، بسیار کوتاه است. بجاست بگوییم که در برپایی آن، نه فقط چند ملت برتر، که همه جوامع بشری شرکت داشته‌اند.

برای اینکه ما در رشته مورد بررسی خود، یعنی تاریخ تحلیلی تکنیکها، این موضوع را مورد بررسی قرار دهیم باید گفت که مفهوم انقلاب صنعتی، چه در صیغه جمع و چه در مفرد آن، تنها یک مفهوم بدون تفسیر است و درباره وجود آن باید به داوری نشست. در اینجا سخن ما ناظر به «نخستین» انقلاب نیست که این همه درباره آن مرکب کرده‌اند و نه به «دومین» انقلاب که

چنان مبهم است که می‌توان آن را تنها لقلقهٔ زبان دانست. دربارهٔ آنچه که گاه‌گاهی به‌عنوان «سومین انقلاب» اصطلاح می‌شود لازم به اظهار نظری نیست. در اینجا تردیدها تشدید می‌شود زیرا دیگر مسألهٔ تغییر شکل یک معضل اجتماعی - اقتصادی وابسته به یک جهش صنعتی در میان نیست. توهم انقلاب سوم صنعتی: در اتحاد شوروی [سابق] تعلیم داده می‌شد که دومین جنگ جهانی منجر به یک «انقلاب علمی و تکنیکی» شده است - انقلابی که زودرس است، بنابراین عمر بلندی نخواهد داشت. بدرستی روشن نیست که این فکر از کجا آمده است. تاریخ‌نویسان شوروی ما را، غالباً به ملاکهای زمانی ویژهٔ خود، به‌حق عادت داده‌اند. اما در مورد تاریخ صنعت، مقطع انقلاب اکتبر، که در زمینه‌های دیگری اثر گذاشته است، توضیحات تکمیل‌کننده‌ای با خود ندارد. این توضیحات حتی در زمینه‌ای که بکلی با آن انقلاب بیگانه است، با وسواس و ملاحظه‌کاری فراوان بیان می‌شود، توگویی اورادی تکرار می‌شوند که فراموش کردن آنها کفر است. محققاً ما دیگر در زمانی نیستیم که مارکس یا لنین را همچون پدران معنوی یک پروتون استالینی می‌دانستند که به بهانه اینکه دانش پرولتاریایی نمی‌تواند طرفدار احتمالات باشد و رشتهٔ ژنتیک مورگان را تفکر «مارکسیستی» رد می‌کند - زیرا دقیقاً مقابل آن است - با یک پروتون بورژوایی، جنگ سرد آشتی‌ناپذیری را به‌پیش می‌برد؛ با این حال، کاملاً به ناگزیر اعلام می‌کنیم که مصالحه‌جویی هنوز دستاویزی برای بعضی تأویلهای تاریخی است و ورود اصطلاح انقلاب علمی و صنعتی در آغاز سالهای پنجاه این سده، آشکارا میوهٔ آن است.

این مفهوم اندیشه‌هایی را که تحت تأثیر مکتب شوروی نیستند، گمراه ساخته است. اما اکنون تا اندازه‌ای انعطاف یافته و انقلاب سوم صنعتی، به‌طور ساده به‌یک انقلاب تکنیکی تبدیل شده است. آیا یادآوری تفاوت معنی این دو مفهوم لازم است؟ چنین نمی‌نماید که آن گروه از نویسندگان فرانسه که اخیراً این نظریه را بسط داده‌اند، نظیر واینل فوریا و پیرسر به تحول تکنیکها در سالهای اولیهٔ سدهٔ بیستم و اساساً در دورهٔ میان دو جنگ جهانی، که می‌توان آن را یک دورهٔ کلیدی دانست، ارزش واقعی داده باشند. چنانچه فرصتی برای تعمق کافی دربارهٔ گسترش حوادث تکنیکی پیش از دومین جنگ جهانی داشته باشند خواهند دید که همهٔ نوآوری‌هایی که از آنها برای تأیید ادعای خویش بهره می‌گیرند میوهٔ دانشی است که در این دوره به‌دست آمده است. این جنگ، شرایطی را ایجاد کرد که مانند جنگ پیش از آن، پژوهشهای تکنیکی سرعت گیرند.

این نویسندگان اظهار می‌کنند: «سومین انقلاب صنعتی، با انرژی هسته‌ای مشخص می‌شود؛ صنایع الکترونیکی و شیمیایی، نوک پیکان آن است، و نیز تکمیل ماشینهای ابزار («اتوماتیسم»)،



تکثیر ماشینهای جدید در هر رشته تولیدی، مینیاتوری کردن، کامپیوترها، تلویزیون و تسخیر فضا در آن جای دارند ... مبادلات بی‌وقفه علوم و تکنیکها در آن سامان یافته‌اند ...» کوشش برای اثبات اینکه همه این دستاوردها با یکدیگر برابر می‌باشند بر عهده خواننده است. می‌توانستند برای سالهای ۲۰ این سده و حتی دهه هشتم سده نوزدهم شرح مشابهی تنظیم کنند.

اثبات ساده تحقق یک انقلاب صنعتی (یا تکنیکی، هرکدام را بپسندید) در سده ما به خودی خود یک فرضیه پژوهشی نیست زیرا بر هیچ نوع تحلیل فرآیند تحول تکنیکها، نه‌تنها در این دوره بلکه همچنین در دوره‌های پیش از آن هم استوار نمی‌باشد. روی هم رفته می‌توان گفت که ما به این انقلاب بسیار نزدیک شده‌ایم، زیرا یک مورخ می‌تواند عناصر شایسته‌ای برای قبول آن در اختیار داشته باشد. انرژی هسته‌ای را مثال می‌آوریم. ما می‌دانیم که اصل آزادسازی انرژی با شکافت هسته‌ای در سال ۱۹۳۹ شناخته شد و احتمال استفاده عملی از آن را لااقل ژولیو و همکارانش پیش‌بینی کرده بودند و آن را در CNRS<sup>۱</sup> (مرکز ملی پژوهشهای علمی) به ثبت رسانیدند. تنها موقعیتهای خاص جنگی سبب شد که تلاشی که، برای اینکه بدون انگیزه‌های اقتصادی و نظامی به نتیجه برسد چند ده سال وقت لازم داشت، طی شش سال ببار نشیند. افزایش تعداد مرکز هسته‌ای، از سال ۱۹۷۳ به بعد، به علت رویدادهای اقتصادی و سیاسی معلومی، اسباب نگرانی است. چنانچه عدم دقت در ارزیابی ذخائر نفتی و نیز قدرت اقتصادی مربوط به جوامع بزرگ چند ملیتی نفتی و اهمیت منابع زغال‌سنگ جهانی را در نظر بگیریم، می‌توان بدین نتیجه رسید که عصر انرژی هسته‌ای تا میانه سده ۲۱ آغاز نخواهد شد، بدین ترتیب، باید پرسید که خصلت انقلابی این تکنیک کدام است؟ از کارهای نخستین ماری کوری تا آغاز کاربرد انرژی هسته‌ای یک سده و نیم باید بگذرد - مدتی که برای گذار از ماشین ساوری به ماشینهای عظیم بخار نیمه سده نوزدهم تقریباً کافی بود.

نمونه‌های دیگری که آقایان فوریاو سرآورده‌اند از همین زمره‌اند. موتورهای موشکها در سالهای ۲۰ و ۳۰ مورد مطالعه قرار گرفتند و گروه آلمانی کارشناسان، طی پنج سال آن را ساختند؛ موشک V۲ برای مقاصد مسالمت‌آمیز، ۲۰ تا ۴۰ سال بعد مورد استفاده قرار گرفت. توربوراکتور، ماشینهای عظیم حساب و رادار هم همین وضع را دارند. در این مورد باید به یادآورد که دقیقاً طی سالهای دهه ۳۰ بود که رشته رادیوالکتریسیته از دل الکترونیک بیرون آمد. نخستین پخش تلویزیونی به سال ۱۹۳۸ برمی‌گردد، و غیره. قبلاً گفتیم که بسیار (پلیم)‌های بلند وینیلی و آکریلی - که اگر آلمان همه امکانات مادی خود را وقف آماده شدن و سپس اداره جنگ نمی‌کرد می‌توانست آن را پیش از امریکا وارد بازار کند - در همین زمان تولید شدند. در واقع این انقلاب آشکار تکنیکی (یا

صنعتی)، بیشتر نتیجه این واقعیت است که امریکا که در آن زمان از آثار نخستین جنگ بهره‌مند شده بود و دور از «خط مقدم» قرار داشت، توانست بازاری را که برای امریکا آغوش گشوده بود تصاحب کند زیرا غنای اقتصادی و صنعتی به آن امکان می‌داد که برای پژوهش و توسعه نوآوریها بر پایه اطلاعات دست اول خود سرمایه عظیمی را وقف کند. این جنگ، کاری را که New deal امریکا هنوز به انجام نرسانیده بود تکمیل کرد.

همکاری دانش و فن: به ادعای آخرین نویسندگان بالا برمی‌گردیم. آنان می‌نویسند: «مبادلات قطع ناشدنی دانش و فن سامان یافتند و این یکی از علل تکامل است.» آیا می‌توان گفت که این کارویژه این دوره است؟ مشکل روابط دانش و فن گویا هنوز مبهم است. برخلاف عقیده‌ای که ابراز شده است علم همیشه مخزن اطلاعاتی نبوده است که تکنیک را تغذیه می‌کنند؛ حتی می‌توان گفت که تا زمانهای نسبتاً اخیر، عکس این رابطه بیشتر حاکم بوده است. اینکه گفته می‌شود همکاری دانش و فن تنها در زمان حاضر ایجاد شده، سخن نادرست است. در پیشگفتار مجلد سوم متذکر شدیم که مبادلات متقابل این دو رشته فعالیت بشری چگونه جان گرفت. در نیمه دوم سده نوزدهم، با سنتز رنگدانه‌های آلی، کاربرد جریانهای چند فاز برق، اختراع موتورهای دیزل و تکامل توربینهای بخار رابطه این دو بتدریج نزدیکتر شد. راه حل مسأله تثبیت نیتروژن جوّی در آغاز سده بیستم، داستان جالبی است که در اثر همکاری آقای نرنست و گروه کارکنان مؤسسه بزرگ آلمانی، که هزینه آن را تقبل کرده بودند، به ثمر نشست. کمی بعد روشهای کراکینگ و رفورمینگ نفت به پیش کشیده شد و نتیجه آنها تولید نایلون بود. در برهه میان دو جنگ جهانی نمونه‌های زیادی از این دست وجود دارد.

ساختارهای پژوهشهای علمی و تکنیکی هرچه بود مبادلات آنها طبیعتاً در مدت کمی از پایه‌های سازمانی برخوردار شدند. این سازمانها را آزمایشگاه‌های تحقیقاتی شرکتهای بزرگ شیمیایی، و ... در اواخر سده گذشته به وجود آوردند. در صنعت الکتریک، متالورژی و رادیوالکتریسیته نیز همین وضع پدید آمد. گرچه در فرانسه CNRS (مرکز ملی پژوهشهای علمی) تا سال ۱۹۳۶ تشکیل نشده بود انستیتوها و بنیادهای متعددی در کشورهای دیگر از جمله در اتحاد جماهیر شوروی [سابق] از حدود نیم سده پیش فعال بودند. آکادمی علوم این کشور که کاملاً نوسازی شده بود قدرت خود را در تمام رشته‌های تحقیقاتی، چه علمی و چه تکنیکی بسط داد.

با آغاز سده کنونی پیشرفت رشته‌های بزرگ تکنیکی تثبیت شد. این پدیده بخشی با کمک ابزارهای محاسباتی بود که از رشته‌های علمی به وام گرفته شد - ابزاری که تا آن زمان کاربرد

محدودی داشت، مثل محاسبه مقاومت مصالح در زمان رونق ساختمانهای فلزی و پلها. ورود محاسبه در تکنیک تنها این معنی را می‌دهد که تکنیک، سراسر دنباله‌رو دانش شده است. معمولاً از ادغام جزئی دو روش آفرینندگی، صحبت می‌شود که به پیدایش زمینه مشترکی انجامیده است که ما بدان، برای سهولت کار، نام تکنولوژی را داده‌ایم. گرچه این اصطلاح در زبان فرانسه تا اندازه مبهم است، در زبانهای دیگر معنی گسترده‌تری دارد. نویسندگان دیگر برای این مفهوم اصطلاح: علم-تکنیک را به‌کار گرفته‌اند. آنان نوشته‌اند که «رشته الکترونیک می‌تواند نمونه‌های زیادی از محاسباتی شدن واقعی این علم-تکنیک را که بر پایه مکانیک گازها و الکترون است و نتایج عملی بی‌سابقه‌ای داشته است به‌دست دهد. رشته الکترونیک دامنه‌ای چنان گسترده دارد که المانها، تریودها، کلیسترون‌ها، مگترونها و غیره، تا برسیم به رادار، تلویزیون ماشینهای محاسبه الکترونیکی و ... را دربر می‌گیرد. در رشته ساختن لامپهای خلأ یا لامپهای مشتعل مثلاً در گازها، تفاوت دانشمند با تکنسین کاملاً از میان رفته است: Heil با Varian برای لامپهای با تحمیل فرکانسی Kampfner برای لامپهای با امواج رونده (۱۹۴۳)، (غیره)».

«سیالیت» تکنیکهای بنیادین: تنها مسأله‌ای که ناگفته مانده این است که دو مجلد باقیمانده این اثر، با چه نوع نگرشی طرح و اجرا شده‌اند. زمانی که پیشرفت کلی تکنیکها، از یک سده پیش تا کنون، را مورد بررسی قرار می‌دهیم، می‌بینیم که این پیشرفت در مسیر تکامل تعدادی رشته‌های اساسی بوده است که تقریباً همه زمینه‌های تولید و وسایل ارتباطی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. برای اینکه در انبوه جزئیات غرق نشویم- جزئیاتی که غالباً نمایش جاننداری از تحول را هم نشان نمی‌دهند- کوشش شده است که این رشته‌ها، معین و برای تعیین ساختار این دو مجلد، به‌کار گرفته شوند. در این راه باید برخی از رویدادها را نادیده گرفت زیرا آنها مجموعاً ما را برای یافتن علت‌های اساسی تکثیر خود در تنگنا می‌اندازند. در اینجا از فصلهای سنتی بررسی اتومبیل، راه‌آهن، فضاپیمایی ... خبری نیست. راه‌های آهن در حدود مجلد پیشین که زمان پیدایش آن را شامل می‌شد بررسی خواهند شد زیرا بدون داشتن اطلاعات کافی از اوضاع و احوال زمان راه‌اندازی آنها، سده نوزدهم، فهمیده نخواهد شد. اما مرحله پایانی تاریخ ما این‌طور نیست، اختراعات و یا اصلاحات فراوانی که وجه امتیاز عصر ماست، تنها ثمره نوعی همگرایی در کاربرد وسایل اساسی نسبتاً معدود است. این وسایل با تولید و انتقال انرژی، وضع آن روز شیمی صنعتی، استخراج فلزات و ساخت آلیاژها و بالاخره طبیعتاً با پیدایش رشته الکترونیک در دسترس قرار گرفتند.

امتیاز این تکنیکهای بزرگ سده بیستم، داشتن نوعی «سیالیت» است که آنها را شایسته عنوان

کلی تکنیک پیچیده می‌کند، تکنیکی که در چهار یا پنج دهه اخیر پایه‌گذاری شده است. تکنیک یا تولید یا روش کار در دوره‌های پیشین، قدرت نوآوری محدودی داشتند. مثلاً چدن کاربردهای گوناگونی نداشت و تنها در بخشهایی، محققاً متعدد، اما به مقدار بسیار کم به‌کار گرفته می‌شد. آهن و سپس فولاد، تا زمانی که تولید آنها زیاد و ارزان نشده بود، همین وضع را داشتند. امکانات کاربرد فلزات، نسبتاً محدود بود؛ و بعدها زمانی که نخست مس به مقدار زیاد و سپس آلومینیوم رواج کامل یافتند گستره کاربرد آنها فزونی گرفت. سرانجام، کروم، نیکل و بعدها تنگستن، تیتان و فلزات «کوچک» و ردیف آلیاژها که عملاً بی‌پایان هستند به بازار سرازیر شدند. از آغاز سده حاضر در تهیه آلیاژها چنان افراط شد که مجموعه تولید متالورژی به چنان سیالیتی دست یافت که توانست تکنیک پیچیده کنونی را پایه گذارد.

همین مطالب را در مورد تولید انرژی هم می‌توان تکرار کرد. موتور بخاری رفت و برگشتی با وجود پیشرفتهای آن هنوز تکنیک خامی بود و بنابراین جای خود را به موتورهای درونسوز یا موتورهای برقی وا گذاشت، میدان کاملاً بازی در برابر این تکنیکهای سیال باز شد و آهنگ نوآوری در این رشته به‌طور تقریباً عمومی سرعت گرفت.

برق صنعتی در مراحل نخستین پیشرفت، در بخش جریان مستقیم، تا مدتها از سیالیت نفوذ بی‌بهره بود اما زمانی که توانستند اشکال گوناگونی از جریانها را تولید کنند و بویژه زمانی که مشکل مربوط به انتقال و تغییر شکل آن رفع شد قابلیت نفوذ یافت. رادیوالکتریسته که به فواصل دور انتقال می‌یافت تنها یک نوع کاربرد داشت که گرچه در آن زمان جالب توجه بود اما مورد استفاده زیادی نداشت، که از آن جمله فضاوردی و دریایی را می‌توان نام برد؛ ولی زمانی که الکترونیک از لامپهای ترمیونی و لامپهای خلأ فراتر رفت این محدودیت نسبی رفع شد. میدان تکنیکی مورد نظر بسرعت وسعت گرفت و زمانی که نیرساناها آنها را در بخش جریانهای ضعیف مورد استفاده قرار دادند و مصالح حجیم تقریباً به‌طور کلی حذف شدند کاربرد آنها در واقع بی‌پایان شد.

روشهای شیمی صنعتی نیز جهش مشابهی داشتند. روشهای تولید مواد رنگی شیمیایی یا دست‌کاری سلولوز ظاهراً جهان دیگری از فرآورده‌های شیمیایی پدید آورد که کاربردهای بسیار گوناگونی دارند. گرچه زمانی که آن را با کاربرد بسپارهای عالی که به روش سنتز کاتالیزوری به‌دست می‌آیند مقایسه کنیم بسیار محدود می‌باشند.

ساختار مجله‌های چهارم و پنجم: شماری از مشخصات تحول تکنیکهای نیم‌سده کنونی شرح داده شد. این مشخصات در دو مجلد اخیر پایه کار ما هستند. اختراع اتومبیل، هواپیما، اتوماسیون را

تنها می‌توان از نتایج پیشرفت موتورها، پالایش نفت، تسلط بر ساختن آلیاژهای ویژه و دسترسی به جریانهای گوناگون برق دانست. نفوذ الکترونیک که تکثیر فرمانهای تشدید (سرو و مکانیسم) را سبب شده است، یا تغییر شکل مشخصات فیزیکی لایه‌ای از اکسید مغناطیسی و قرائت تغییرات ثبت شده در این کار مؤثر بودند.

از پراکنده بودن برخی مطالب همگان اطلاع دارند. و با شناختن این اجزای پراکنده، می‌توان به ساختار کلی آنها پی‌برده گرچه خواسته‌ایم از تک نگاره‌های ضد و نقیض، اسناد فراوانی که برای چنین کارهایی پرتگاههای مهیبی به‌شمار می‌روند، بپرهیزیم، متأسفانه کمبود اطلاعات، مراجعه بدانها را ناگزیر ساخته است. شاید این ادعا، که تاریخ ساخت اتومبیل و فضاوردی تقریباً ناشناخته مانده است تکان‌دهنده باشد. در حال حاضر تاریخ آنها در واقع داستانی آکنده از شوخیا و ثبت نمونه‌های تولید شده و رکوردهاست. جامعه‌شناسان و اقتصاددانان، به شکلی طبیعی و تا اندازه‌ای درست، سرگرم تدوین آن هستند اما هنوز بخش بزرگی از تابلوی تکنیک آن در سایه مانده است. جز تاریخ سازماندهی کار زنجیری، مراحل دیگر تولیدی آن، پیدایش پی‌درپی روشهای مونتاز، تعویض قطعات قدیمی با قطعات بهتر، تکمیل تجهیزات الکتریکی، تحول سیستمهای روغن و غیره آن‌طور که باید بررسی نشده‌اند.

نواقص دیگر این تاریخ به ما اجازه‌دستیابی به سطح اولیه‌ی روشهای ساخت یا تولید را نمی‌دهد. گذشته ساخت لامپها و سیمهای برقی، سیم‌سازی، میخ‌سازی، پیچ‌سازی، جوشکاری و شکلهی به فلزات، یا تاریک مانده، یا تا اندازه‌ای روشن شده است. ما توانستیم برخی از آنها را، گرچه به اختصار، تنظیم کنیم تا مقدمه‌ای برای این کار باشد؛ مثلاً ساخت کابلها در مبحث بالا برها. با این حال، ما در پرتو کار شایسته آقای ژاک پاپن توانستیم تاریخ کاملی از یکی از این تکنیکهای اساسی به‌دست دهیم. هر زمان که تاریخ ماشینهای بخار مطرح می‌شود ظاهراً گمان می‌کنند که مرحله خود تولید بخار، در حقیقت تحصیل حاصل است و از تحول دیگهای بخار سرسری می‌گذرند، درحالی که دیگهای بخار در همه مراحل تکاملی ماشینهای بخار، هم رفت و برگشتی و هم نوع گردان، مطرح بوده‌اند و غالباً نقش اصلی داشته‌اند. برای اینکه این رشته خاص در مجموع خود عرضه شده باشد باید اطلاعات جسته و گریخته‌ای را که در مجلدهای پیشین آمده است، در اینجا گرد آورد؛ پراکنده بودن این اطلاعات، اهمیتی را که آنها از آغاز کار تا کنون داشته‌اند، از دیده‌ها پنهان ساخته است. بدین ترتیب، دو مجلد باقیمانده این اثر بر شمار نسبتاً کمی از رشته‌های صنعتی تکیه می‌کنند که با این همه بعضی از آنها گوناگونی فراوان دارند. منطقی است که با وسایل تولید انرژی، بخار،

احتراق درونی، شکافت هسته‌ای سخن را آغاز کنیم و با برق صنعتی که گرچه یک منبع انرژی نیست نوعی تکنیک انتقال انرژی یا تغییر شکل و محل آن است آن را ادامه دهیم. پس از آن به تولید فراورده‌های شیمی صنعتی و تکنیکهای استخراج و کار روی فلزات بپردازیم.

برای اینکه فرآیند ساخت قطعات ادامه یابد ظاهراً صنایع تغییر شکل آنها باید بخش دیگری را تشکیل می‌دادند. این بخش تنوع بسیار دارد و عملیات گوناگونی را شامل می‌شود که گاهی چند رشته از آنها را به‌طور قراردادی تحت یک عنوان بررسی می‌کنند اما به‌طور کلی انواع کارهای شکلهی و مونتاژ اساسی قطعات را دربر می‌گیرد. این بخش شامل ابزارهای زمانسنجی، ماشینهای ابزار، شاخه‌های بزرگ ساخت، ماشینهای چاپ، اتومبیل‌سازی، ماشینهای کشاورزی و موتورهای راهسازی است. گنج‌نیدن ساخت بناهای صنعتی که در زمان ما به کارگاههای بزرگ تبدیل شده‌اند و کاربرد روزافزون مصالح پیش‌ساخته، در این بخش منطقی است.

بخش مهم دیگری از تمدن تکنیکی ما گردآوری اطلاعات، ابلاغ و نتیجه‌گیری از آنهاست. ما، البته بدرستی، مفهوم اطلاع‌رسانی را به مسایل ثبت و پخش صوت و تصویر گسترش داده‌ایم. عنصر اصلی این بخش، طبیعتاً، گسترش ارتباطات رادیویی و پیشرفت الکترونیک می‌باشد - چیزی که به پیدایی کامپیوتر انجامید.

با وجود تصمیمی که گرفته بودیم که منظره تکنیکی این اثر تا پایان حفظ شود، چنین می‌نماید که روابط بین عامل انسانی و تکنیکهای تولید را نباید از یاد برد. شکی نیست که در ادوار گذشته، مشکلات مربوط به کارگران صنعتی در تحول کلی تکنیکها تأثیری نیرومند داشته است. و دیده خواهد شد که این امر از آغاز عصر صنعتی وجود داشته است. بررسی فیزیولوژی کار که با دخالت مفهوم ارگونومی (شناخت قواعد کار) کمال یافت یکی از جنبه‌های این مشکلات است که با افزایش روزافزون سلطه کارگاه بر انسانها، باید در نظر گرفته شود. سرانجام، هرکس می‌داند که در عصر ما، کار تولیدی، تنها می‌تواند در چارچوبی از تشکیلات کارگری و کارفرما، چارچوبی که در بهتر شدن آن، همواره کوشش شده است و از آغاز عصر صنعتی تا کنون روشهای حاکم بر آن پیوسته در حال تغییر بوده است. به پیش برود. فصل پایانی این کتاب در این موضوع بحث می‌کند و همراه دو فصل ماقبل، اگر توان آن را همچون نتیجه بحث در نظر گرفت، لاقلاً پیشدرآمدی برای آن همکاری مورد علاقه لوسین فور به‌شمار می‌آید.

بخش اول

تولید انرژی

## ماشینها و توربینهای بخار

### تحول انواع ساختاری و کارکردی

خوانندگان اکثر کتابهای تاریخ اقتصاد معمولاً این احساس را پیدا می‌کنند که تاریخ ماشین بخار در زمانی قطع می‌شود که کاربرد این ماشین در صنعت رواج یافته و کلاسیک شده است: میانه سده نوزدهم. چنین احساسی از بن نادرست است. تفاوت یک ماشین دوره لویی فیلیپ با مدل‌های بسیار پیشرفته مربوط به آغاز سده بیستم لااقل همان اندازه زیاد است که یک ماشین نیوکامن با ماشین وات. می‌توان گفت که وات، با نوآوریهای خود، که مهمترین آن کندانسور جداگانه بود مصرف سوخت را به یک‌چهارم رسانید؛ یا از ۱۶ به ۴ کیلوگرم برای هر اسب بخار در هر ساعت. این پیشرفت با جهش ناگهانی پدید آمد. در دوره پس از آن، برعکس، اصلاحات پشت سر هم پدید آمدند و گویا به‌همین جهت درخشش آنها زیاد نبود. گرچه مصرف با همین نسبت کم شد: یعنی برای هر اسب بخار در یک ساعت، مصرف سوخت از ۴ به ۱ کیلوگرم کاهش یافت. بعضی ماشینهای بسیار تکامل یافته، در حدود سال ۱۹۰۰، آن‌طور که می‌گویند، مصرفشان به‌طور متوسط، حتی از ۶۰۰ گرم بیشتر نبود. روشن است که این صرفه‌جویی، فی‌نفسه ارزش چندانی نداشت؛



تفاوت ۱۶ و ۴ برابر ۱۲ کیلوگرم است درحالی که ۱/۴ از ۳ کیلوگرم بیشتر نیست. اما این تفاوت برای اینکه مواردی، بویژه ناوبری در مسافتهای طولانی، امکانپذیر شوند، کافی بود. کاری که در گذشته عملی نبود.

درباره تحول واحدهای ماشینکاری، توانهای جرمی (توان بر کیلوگرم وزن ماشین) و فشارهای کارکردی سخن بسیار است. همه این مسائل در زمینه کاملاً مشخص خود بررسی شده اند. ما در نخستین بند (پاراگراف) بسیار کوتاه خود، تحول صوری ماشینها یا به اصطلاح انواع ساختاری آنها را باز نمودیم. هر ماشین یک پیستون و یک محور دارد که اجزای انتقال دهنده حرکت از یکی به دیگری می باشند؛ وضعیت حجمی آن نیز که انواع ساختاری ماشین را مشخص می سازد همین است. انواع این ماشینها برحسب طرز کار خود مشخص می شوند و اساساً به موتورهای ثابت، لوکوموتیوها، و موتورهای کشتی تقسیم شده اند.

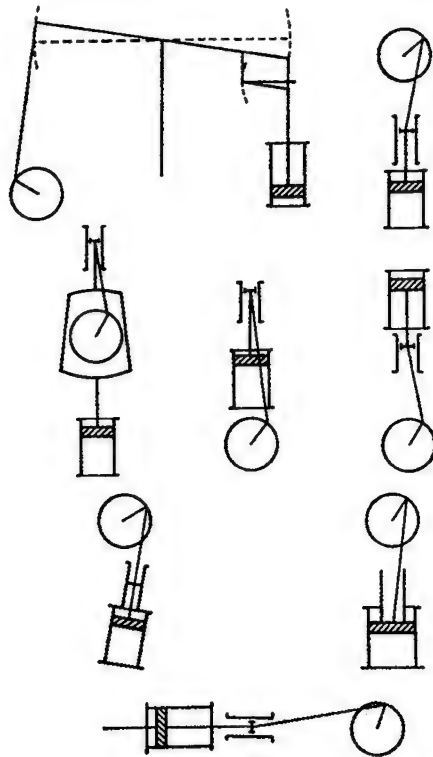
دو بند بعدی به طرز کار ماشینها مربوط می شود، یعنی چگونه قدرت بخار با فشار روی پیستون در داخل سلیندر، اعمال می شود.

اولی مربوط به روشهای ارزیابی قدرت ماشینها، از راه بررسی یا محاسبه است. در این قسمت، تاریخ مفاهیم اساسی ماشینهایی را که تا روزگار ما درکار هستند، و از آن جمله موتورها، را بازگویی می کنیم. این امر ما را به مسأله تأثیر متقابل ترمودینامیک و ساختمان ماشینهای بخار، و نیز تبیین این نکته که برخی مسائل تا زمان پیدایش یک نظریه خاص موسوم به نظریه تجربی نمی توانستند حل شوند، رهنمون می شود.

دومی سراسر به مسأله اساسی دتانت (کاهش فشار) گاز می پردازد و به دو بخش تقریباً دارای ترتیب زمانی تقسیم می شود: نخست کاهش فشاری که در یک سلیندر ایجاد می شود و بعد کاهش فشاری که در چند سلیندر، پیاپی رخ می دهد: کاهش فشار چندگانه. ما با بررسی ماشینهای بخار پیستوندار، سخن را به پایان می بریم.

در پاراگراف بعدی به بررسی پیدایش و تکمیل توربینهای بخار می پردازیم. این توربینها هنوز برای ایجاد قدرت زیاد، رایج هستند.

سرانجام، پاراگراف پنجم یا آخری به تاریخ دیگهای بخار و کندانسورها تعلق دارد. گرایش فراوانی دیده می شود که از این دو وسیله نامی برده نشود زیرا به غلط آنها را از ضمام کار به شمار می آورند. نقش آنها همیشه برجسته بوده است و همواره مورد استفاده قرار گرفته اند. بویژه کندانسورها با کاربرد توربینها اهمیت فراوان یافتند زیرا می توانستند کاهش فشاری بسیار بیشتر از ماشینهای بخار پیستونی داشته باشد.



شکل ۱. نمای اجمالی انواع کارکردی ماشینهای بخار. از چپ به راست و از بالا به پایین: شاهنگی، عمودی با عمل مستقیم، ناقوسی، عمودی با شاتون بازگشتی (ماودزلی)، هاونی، نوساندار، جعبه‌ای، افقی با عمل مستقیم.

### ماشینهای ثابت

همان‌طور که در مجلد قبلی آمده است در نیمه نخست سده نوزدهم ماشینهای بخار شاهنگی به‌کار می‌رفتند. طی همین دوره انواعی از ماشینهای بخار رواج یافتند: ماشین بخار عمودی با عمل مستقیم (پیستون مستقیماً روی میل‌لنگ عمل می‌کند - م) یا محور در بالا، ماشین بخار میزی ماودزلی، ماشین بخار شاسی‌دار فارکو، ماشینهای نوساندار که در کشتیها به‌کار گرفته شدند، و ماشینهای به اصطلاح ملخی *grasshopper* که نوعی از ماشینهای بخار شاهنگی با قدرتهای کم بودند که از آن منشعب شدند (شکل ۱).

سرنوشت این ماشینهای بخار با آن همه گوناگونی ساختاری، در نیمه دوم سده نوزدهم چه بود؟ همه آنها کنار گذاشته شدند و تنها ماشین با دیگ بخار شاهنگی مدت زیادی در کار باقی ماند، بنابراین، جا دارد که چند کلمه‌ای درباره آن بگوییم.

ماشین بخار شاهنگی: بی‌فایده نیست که بدانیم از این گروه ماشین بخار، لااقل سه نوع آن بر پایه مقاومت مختلف توان - به کار گرفته می‌شدند.

هر سه نوع این ماشینهای بزرگ، در حقیقت بدون پایه بودند و آنها را در اسکلت ساختمان محکم می‌کردند و قطعات اساسی ماشین مستقیماً روی این اسکلت تکیه داده می‌شدند. وضع ماشین بخار کورنوال و تلمبه‌های عظیم و یکطرفه آن، که طرز کار آنها بعدها بتفصیل خواهد آمد چنین خواهد بود. ماشینهای بخاری که آقای بلگران<sup>۱</sup> در عهد امپراطوری دوم در شایو<sup>۲</sup> نصب کرد از همان نوعی بودند که آقای ژاک کنستانتن پریه در زمان لویی شانزدهم ساخته بود.

اما، برعکس، ماشینهای شاهنگی با قدرت کم، پایه‌های بسیار ضعیفی به شکل A داشتند که انگلیسیان بدان A-frame می‌گویند. آقای فارکو از این نوع ماشین هم در فرانسه ساخته است. نوعی که بیش از بقیه ماشینهای شاهنگی رواج یافت ماشینی با شش ستون بود که یک قرنیز مستطیلی را سرپا نگاه می‌داشتند و جمله این دستگاه بشیوه معماری کلاسیک به سلیقه روز ساخته می‌شد. موتورهایی که معمولاً در صنعت کار می‌کردند از همین نوع بودند. بویژه در فرانسه ماشین دو انبساطی، که ماشین وولف نامیده می‌شد، رواج عمومی یافت. در صنعت نساجی این ماشین با استقبال گرمی روبه‌رو شد و کاربرد آن بیشتر از بقیه پایدار ماند. این امر نتیجه پیدایش سازندگان محلی آنها در شمال و نورماندی بود. این واقعیت بسیار عجیب است زیرا ساخت ماشین بخار در اطراف پاریس کاملاً متمرکز شده بود. در نمایشگاه جهانی سال ۱۸۸۹ تنها یک ماشین شاهنگی دیده می‌شد که ساخته دست یک مکانیسین اهل نورماندی بود. این احتمالاً یکی از آخرین ماشینهایی بود که آنها ساخته بودند. باید روی دوام استثنایی موتورهای قدیمی انگشت گذارد. ماشینهایی که در سالهای ۱۸۲۵ - ۱۸۳۰ ساخته شده‌اند یا به دست شتلهین آلزاسی یا بولتون و وات برای کارخانه لوگلباخ<sup>۳</sup> بودند - که ما بدانها باز خواهیم گشت - این ماشینها تا سالهای ۱۹۲۵ - ۱۹۳۰ اوراق نشده بودند.

1. Belgrand

۲. Chaillot: کاخی که در سال ۱۹۲۷ بوسیله دو معمار فرانسوی ساخته شده است.

3. Logelbach

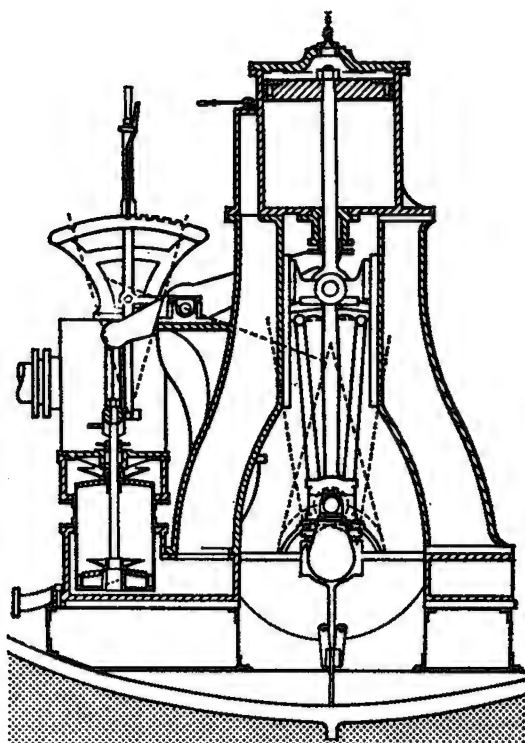
ماشین افقی: از سال ۱۸۵۰ ماشین افقی رواج فراوان یافت. این ماشینها علاوه بر کاربردی که در لوکوموتیوها داشتند بوسیله چند ماشین ساز لندنی با نامهای تیلور و مارتینو<sup>۱</sup> (مجلد سوم، صفحه ۱۰۶) در حدود سال ۱۸۲۵ جهت مقاصد دیگری ساخته شدند. در فرانسه، آقای آلت از آراس در سال ۱۸۴۷ دو ماشین افقی با قدرت ۲۰۰ اسب برای تلمبه تخلیه هوا جهت راه آهن سن - ژرمن ساخت. در این زمان متوجه شدند که عقیده رایج مربوط به بیضی شدن مقطع استوانه تلمبه به علت رفت و آمد پیستون، بی پایه است. نمایشگاههای جهانی لندن در سال ۱۸۵۱ و پاریس در سال ۱۸۵۵ شاهد سلطه ماشینهای افقی بودند. این سلطه تا سالهای حدود ۱۹۲۰ و پایان کار تلمبههای تخلیه ای پیستوندار ادامه داشت. تلمبههای با جریان یکنواخت، که درباره آنها باز سخن خواهیم راند، عموماً از ماشینهای افقی بودند. اما حالت افقی آنها در موتورهای دیزلی حفظ نشد، گرچه گاهی از آنها به عنوان موتورهای پر قدرت گازی کورههای بلند استفاده شده است.

ماشینهای هاوونی: در حدود سال ۱۸۷۵ نوع دیگری ماشین به کار گرفته می شد، ماشین عمودی با سیلندرهایی که در بالای آن کار گذاشته می شد، مثل چکشهای هاوونی. به همین جهت این ماشینها، هاوونی نامیده شدند. ماشینهای هاوونی و افقی همگام رواج یافتند اما نوع هاوونی هنوز هم در موتورهای دیزلی فعال است. ما در بحث راجع به ماشینهای کشتی، باز بدانها خواهیم پرداخت (شکل ۲).

مآخذ ماشینهای هاوونی بدرستی شناخته شده نیستند. پیش از سال ۱۸۶۰ آقای نازمیث یکی از این نوع را به عنوان موتور نوردکاری ساخت. حدود سال ۱۸۶۵ آقای بزژامن نورمن از آنها برای حرکت کشتی استفاده کرد. ماشینهای هاوونی به نظر ما در فاصله زمانی دو نمایشگاه ۱۸۷۸ و ۱۸۸۹ رواج زیادی یافتند. آقای امه ویتز درباره آن سخن رانده است.

بعدها این وضع تثبیت شد. هر دو نوع، از جنبه مکانیکی ارزش یکسانی داشتند. بویژه هر کدام از آنها را برای انبساطهای چندگانه آماده ساختند. اما از لحاظ فضایی که اشغال می کردند بین این دو نوع تفاوت بسیار بود. ماشین افقی کوتاه بود اما سطح زیادی می گرفت؛ ماشین هاوونی بلند بود اما سطح کمی را اشغال می کرد. ما بعداً درباره اهمیت ابعاد آنها، بویژه در مورد ماشینهای پر قدرت سخن خواهیم گفت و نشان خواهیم داد که مزاحمت بزرگی آنها اغماض پذیر نیست. سخن آخر اینکه در زیر نام *Manhattan engine* ماشینهای بسیار پر قدرتی، گویا ساخته امریکا، جای داشتند که یک ماشین افقی و یک ماشین هاوونی را در روی یک بازو به یکدیگر متحد می کردند.

1. Martineau



شکل ۲. مقطع عرضی یک ماشین هاوونی که در بدنه یک کشتی نصب شده است. چپ کندانسور و تلمبه هوا.

### لوکوموبیل‌ها، راهپیم‌ها، ماشینهای نیم‌ثابت

نمونه‌های اولیه: علاقه به تبدیل ماشین بخار با قدرت متوسط به یک وسیله قابل انتقال، برای منظورهای گوناگون و محلهای مختلف، به‌طور نابه‌هنگام پدید آمده بود. اما در نیمه نخستین این سده، تنها نمونه‌های استثنایی از آن وجود داشت. اطلاع از اینکه شاگردان هنرستان شالون - سور - سون<sup>۱</sup> در سال ۱۸۱۹ در نمایشگاه صنایع ملی، برای ساختن یک ماشین بخار متحرک جایزه‌ای دریافت داشتند شگفت‌انگیز است. این ماشین دارای برخی خصوصیات لوکوموبیل آینده بود. بخصوص باید شباهت آن را با لوکوموتیو یادآور شد - شباهتی که پایدار ماند. شاگردان این هنرستان، یا به عبارت

۱. Chalon-sur-Saône شهری در شرق مرکز فرانسه، در بورگونی، کنار رود سون.

باید شباهت آن را با لوکوموتیو یادآور شد - شباهتی که پایدار ماند. شاگردان این هنرستان، یا به عبارت بهتر می‌توان گفت، استادان آنها بی‌شبهه از نخستین لوکوموتیوهای بلنکینسوپ و استیونسن و نیز از ماشینهای پرفشار ترویشیک بی‌اطلاع نبودند. سیلندره‌های عمودی آن در دیگ بخاری که کوره در داخل آن بود، بالا و پایین می‌رفتند. اما این ماشین‌کندهانسوری داشت که در زمان توقف در جنب منبع آب سرد، کار می‌کرد.

کمی بعد، مالدزلی، ماشین‌ساز پرآوازه انگلیسی لوکوموبیل‌هایی با دو گروه چرخهای مستقل ساخت. که گروهی از آنها برای دیگ بخار و گروه دیگر برای خود ماشین بود. یکی از این ماشینها مطمئناً پیش از سال ۱۸۳۰ به فرانسه وارد شده بود و در بندرگاه لوریان کار می‌کرد. آلت، ماشین‌ساز سرشناس آراس، برای بندر شربور، یک کپی از آن را ساخت، که از سال ۱۸۳۱ به‌کار گرفته شد. اما همه این مطالب، مقدمه بحث را تشکیل می‌دهند. لوکوموبیل‌های کلاسیک، ریشه در کشاورزی دارند و به همین علت نخست در کشورهای ساخته‌شده که پیشرفت ماشینهای کشاورزی در آنها بسیار پیش‌رس بود؛ یعنی کشورهای انگلیس و ایالات متحده آمریکا. دلیل این امر، انطباق این ماشین با شرایط اجتماعی - اقتصادی آن کشورها بود. وجود زمینهای بزرگ زراعی، در عین حال هم سطوح بزرگ و هم سرمایه‌های گزاف را به آسانی در اختیار می‌گذاشت؛ شرایطی که کاملاً معکوس وضع فرانسه بود.

کاربرد نیروی محرکه بخار در ممالک متحده آمریکا در سال ۱۸۰۷ در کشتزارهای بزرگ جنوب آغاز شد. اما نخست تنها از ماشینهای ثابتی استفاده می‌کردند که اره‌ها، آسیابهای غله یا نیشکر، ماشینهای حلاجی و وش‌زنی پنبه به‌کار می‌انداختند. در سال ۱۸۳۸ تعداد این ماشینها به ۵۸۵ عدد بالغ می‌شد.

طبق انتشارات اخیر آمریکا، ماشینهای بخار متحرک که بر چرخهایی قرار داشتند، چه در شمال آمریکا و چه در جنوب آن، تا سال ۱۸۴۹ وجود نداشتند که اسب آنها را جابه‌جا می‌کرد. این ماشینها با قدرتی برابر ۱۰ یا ۲۰ اسب ساخته شدند و بهای آنها حدود ۱۰۰۰ دلار بود.

آغاز پیشرفت: در انگلستان باید گفت که در نمایشگاه جهانی سال ۱۸۵۱ لندن، می‌توانستند با ۱۸ نوع لوکوموبیل‌های گوناگون آشنا شوند که اغلب آنها ساخت بریتانیا بود. سه نفر از بهترین سازندگان آنها آقایان: کلیتون - شاتل‌ورث<sup>۱</sup>، تاکسفورد<sup>۲</sup>، هورنسبای<sup>۳</sup> بودند. آقای آرتور مورن یکی از این لوکوموبیل‌ها را از آقای تاکسفورد برای کنسرواتوار پیشه و هنر خرید - وسیله‌ای که هنوز در آنجا نگهداری می‌شود. متأسفانه این نمونه بد انتخاب شده بود، مکانیسمی بسیار پیچیده و ظریف

داشت. این سیستم هیچ رواجی نیافت و اقتباسی از آن به‌عمل نیامد. این خرید افتخاری برای مکانیسین سرشناس فرانسوی حسن شهرتی کسب نکرد. فرانسوا کالا، با هشیاری بیشتر، ماشین کلیتون-شاتل‌ورث را تقلید کرد و با استقبال زیاد روبه‌رو شد و صنعت لوکوموبیل‌سازی فرانسه آن را پایه کار خود قرار داد. کالا در سال ۱۸۵۶ تعداد ۳۰۰ دستگاه ماشین ساخت که نماینده قدرتی برابر ۲۰۰۰ اسب بود. در سال ۱۸۶۲ این تعداد سه برابر شد. آقایان روفه، آنژبو، فلود<sup>۱</sup>، دورن در همین راه گام برداشتند. دو نفر اخیر، به بررسی ماشینی با سرعت نسبتاً زیاد پرداختند تا بدون اینکه وزن ماشین افزایش یابد قدرت آن بیشتر باشد.

یک لوکوموبیل کلاسیک چگونه است؟ آقای امه ویتز وصف روشنی از آن دارد: «دیگ بخار آن مانند دیگ بخار لوکوموتیوها از نوع لوله‌ای (دودی) است تا مقدار زیادی بخار بسرعة ایجاد کند. این دیگ حامل ماشین، که افقی است و نیز «تلمبه تغذیه آب» می‌باشد. این مجموعه چنان بر روی چرخها قرار گرفته است که چند اسب می‌توانند آن را بکشند. موتور آن بدون میعان و دارای فشار زیاد است. بخار آن وارد شومینه می‌شود تا اینکه عمل کشش بخار انجام گیرد، اما کشش آنچنان شدید نیست که زغال‌سنگهای نیم‌سوخته به بیرون پرتاب شوند، زیرا، در این صورت، در کشتزارهایی که غالباً از این موتور استفاده می‌کنند ناراحتیهای بزرگی ایجاد می‌شود.»

آقای لویی فیگیه می‌افزاید که «لوکوموبیل روستا را همان قدر می‌توان در ردیف ماشینهای بخار به‌شمار آورد که ساعت دارکوبی (چوبی) موزه نوار (جنگل سیاه) را ساعت: وسیله‌ای بسیار زمخت اما مناسب.» شرایط کاری آن در واقع بسیار سخت هستند. این ماشین باید بتواند در راههای ناهموار حرکت کند، تحمل هوای بد را داشته باشد، و بالاخره بویژه بدون اینکه مواظبت چندانی از آن به‌عمل آید دوام بیاورد. حداکثر وزن آن نباید از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بیشتر باشد.

در دوران امپراطوری روم، نمونه‌ای با قدرت چهار اسب و وزن دو تن به مبلغ ۴۰۰۰ فرانک دادوستد می‌شد. این وسیله طی ۱۰ ساعت کار، مقدار ۱۷۶ کیلوگرم زغال و ۱۴۵۰ لیتر آب مصرف می‌کرد. در آن زمان می‌توانستند ۷۵ هکتولتر غله را بکوبند. دیده می‌شود که مصرف زغال آن ۴/۴ کیلوگرم در هر ساعت برای هر اسب است که مقدار زیادی است. در سال ۱۸۷۰ توانستند مصرف آن را تا ۲ کیلوگرم در ساعت برای هر اسب، تنها برای ماشینهای با قدرت چهار اسب، پایین آورند.

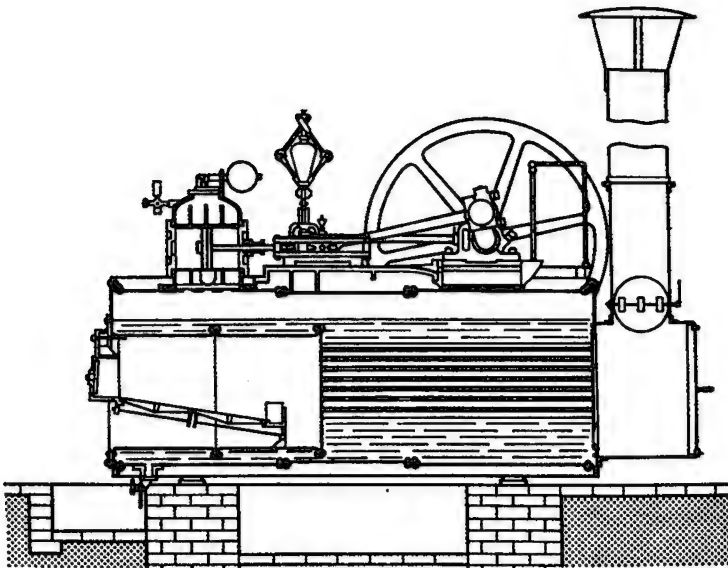
در مورد کاربرد آن در بخش کشاورزی باید گفت که در سال ۱۸۶۰ آزمایشهای چندی برای شخم‌زنی، درو، و حتی کرت‌بندی با آن به‌عمل آمد که دنبال نشد. تنها کاربرد آن به عنوان

خرمنکوب، معمول شد. در کارهای ساختمانی، کاربرد لوکوموبیل رونق چشمگیری یافت؛ مثلاً از عمیق کردن سطح آب کانال سن - مارتن بوسیله آن صحبت می‌شود - کاری که در سال ۱۸۶۰ پایان گرفت. لوکوموبیل‌های زیادی در خشکانیدن، خاکبرداری، حمل مصالح و خرد کردن سنگها و مخلوط‌سازی شن با سیمان فعال بودند.

راهپیمایها: یک لوکوموبیل را می‌توان به آسانی طوری ساخت که به‌عنوان لوکوموتیو راهپیمای کار کند. بسیاری از پژوهشگران به امید حل مسأله مکانیکی کردن وسایل حمل‌ونقل در این بخش کار کردند (مجلد سوم، صفحات ۳۷۵ تا ۳۸۵). در این راه با اینکه از دیگهای بخار مناسب لوکوموتیو استفاده کردند هیچ موفقیتی به‌دست نیاوردند. با این‌همه، در سالهای ۱۸۷۰ - ۱۸۸۰ در ساخت لوکوموبیل‌ها تغییر کلی داده شد و درحالی‌که باز آن را لوکوموبیل می‌نامیدند در حقیقت تنها به ساخت لوکوموتیوهای راهپیمای می‌پرداختند و غالباً آنها را راهپیمای می‌نامیدند که می‌توانست با موتور ثابتی کار کند. بیش از هرچیز، خرمنکوب متحرک می‌ساختند که آن را از کشتزاری به کشتزار دیگر انتقال می‌دادند، «لوکوموبیلی» آن را می‌کشید و به‌کار می‌انداخت. حدود سال ۱۸۷۶ بود که ارتش فرانسه کوشید تا راهپیمایها را برای حمل توپخانه به‌کارگیرد. یک ماشین با قدرت هشت اسب در آن زمان بسیار سنگین بود و می‌توانست توپهای ۲۲ تنی را به‌دنبال بکشد گرچه سرعت آن در هر ساعت از هشت کیلومتر فراتر نمی‌رفت. برتری آن نسبت به کشتی یا قاطر آن‌قدرها نبود که این کار را بتوان تحولی نامید و به‌کارگیری قاطر برای این کار ادامه یافت.

ماشین نیم‌ثابت: ماشینهای نیم‌ثابت گروه مهم دیگری را تشکیل می‌دهند. در مورد آنها باید ابهاماتی را برطرف ساخت زیرا نویسندگانی در گذشته آنها را لوکوموبیل‌های صنعتی نامیده‌اند. اما این ماشینها روی چرخها حمل نمی‌شدند، بلکه حجمهایی بودند که جابه‌جا کردن آنها در صورت نیاز دشوار نبود، به بخاریهای فرنگی شباهتی داشتند. بهترین نمونه پاریسی آنکه در سال ۱۸۶۰ وجود داشت ساخت کارخانه هرمان - لاشاپل بود. تنه این ماشین از یک سکوی گرد و یک پل تشکیل شده بود. دیگ بخار آن عبارت بود از حلقه‌ای از لایه آب بین دو تیغه فلزی و لوله‌های آب که از داخل یکدیگر را قطع کرده بودند. سیلندر آن هم عمودی و به پایین یکی از ستونهای پل محکم شده بود. محور آنکه در قسمت فوقانی قرار داشت. همراه با چرخ طیار یا فلکه آن در طرف مقابل میل‌لنگ بودند. ماشین نیم‌ثابت هرمان - لاشاپل در اواخر امپراطوری دوم در بخش صنایع کوچک پاریس رواج بسیار یافت - رواجی که تا مدتها ادامه داشت. آقای بوله مدیر کارگاهها و سازنده این مدل در سال ۱۸۷۹ در رأس این مؤسسه قرار گرفت. ماشینهای نیم‌ثابت آقای بوله دارای قدرتی از





شکل ۳. ماشین نیم ثابت وولف.

دیگ بخار لوله دودی که سکوی بخش مکانیکی ماشین را تشکیل می دهد.

یک تا چهار اسب با دانت ثابت و شش تا بیست اسب با دانت تنظیم پذیر بوسیله رگولاتور بودند. در فرانسه طبق فرمانی به تاریخ ۳۰ آوریل ۱۸۸۰ استفاده آزاد این ماشین در هر کارگاه مجاز شمرده شد. اما از این تاریخ به بعد بود که در صنایع کوچک، بویژه در پاریس، کار زندانیان با اعمال شاقه که مجبور به گرداندن میل لنگ بودند در بیشتر جاها به یک موتور کوچک واگذار شد. در اواخر سده نوزدهم دو مدل دیگر از ماشینهای نیم ثابت اهمیت یافتند. می بایست از ماشین دیوی - پاکسن<sup>۱</sup> با دیگ بخار افقی نام برد. در این زمان که دوران اولیه الکتروتکنیک بود، این ماشین غالباً در مراکز الکتریکی کوچک به کار گرفته می شد. مدل دیگری که بسیار متداول هم بود ماشین نیم ثابت وولف از ماگدبورگ با دیگ بخار افقی و کوره تعویض پذیر بود (شکل ۳). این سیستم در سالهای ۱۸۶۰ بوسیله آقایان توما، لورنس، و پرینیون به ثبت رسیده بود. معلوم نیست که سازنده آلمانی این ماشین برای ساخت آن چه شرایطی پیشنهاد می کرد. آقای وولف در سال

1. Davey-Paxman

۱۹۰۰ تخمین می‌زد که از سال ۱۸۶۲ به بعد حدود ۸۰۰۰ عدد از این ماشین تهیه کرده است. مصرف سوخت این ماشین به برکت ساخت بسیار تکمیلی آن، که بخار داغ تولید می‌کرد، روکش، دانات تنظیم‌پذیر و دو انبساط برای قدرتهای بسیار بالا، در سال ۱۹۱۴ بسیار پایین آمده و به ۶۰۰ گرم زغال در هر ساعت برای یک اسب رسیده بود.

### ماشین‌ابزارهای بخاری

در سالهای ۱۸۴۰ - ۱۸۶۰ ماشین‌ابزارهای متعددی ساخته شده که ماشین بخاری در دل خود داشتند. آقایان لئونس توما و کامی لورنس از پیشگامان کاربرد این نوع ماشین‌ابزار در فرانسه بودند. مثلاً ساخت چکشهای مکانیکی، دستگاههای نورد، غلتکهای کاغذسازی، ماشینهای کوبیدن تیر در زمین از برکت این مکانیسم است.

اما زمانی که کار مورد نظر، مستقیماً بوسیلهٔ دستهٔ پیستون انجام گرفت موضوع کمی فرق کرد. مهمترین ماشین‌ابزار از این دست، چکشهای هاونی می‌باشند که لزومی نمی‌بینیم در اینجا آنها را بررسی کنیم (رجوع کنید به جلد سوم، صفحات ۲۱۷ تا ۲۲۱). ماشینهای دیگر با عمل مستقیم، دمه‌ای پیستوندار کوره‌های متالورژی هستند؛ اختراع این دمه‌ها و نیز تلمبه‌های یکطرفه به ویلکینسون نسبت داده شده است. تلمبه‌های شاهنگی یکطرفه - که حرکت درونی ایجاد نمی‌کردند - شباهت آشکاری به ماشینهای با اثر مستقیم داشتند.

بدین ترتیب، در چنان اوضاعی در استفاده از اصل دوران تعللی نشد؛ این اصل که بر پایهٔ کاربرد یک چرخ طیار قرار داشت کار را بسیار منظم می‌کرد. این کار به هیچ وجه مانع گذاردن پیستون دمشی روی همان دستهٔ پیستون موتور نمی‌شد - کاری که آقایان توما و لورنس عملی کردند و مجموعهٔ دستگاه را شکل افقی دادند (۱۸۵۳).

در ماشینهای تغذیه‌کنندهٔ آب دیگهای بخار کشتی، از نوع «اسب کوچک» نیز همین مکانیسم وجود داشت. حرکت دورانی آن تنها برای محدود ساختن حتمی رفت پیستون و به بازی گرفتن فلکهٔ ناظم بود. «اسب کوچک» تغذیه‌کنندهٔ آب از سال ۱۸۶۲ در کشتیهای فرانسه اجباری شد. قیچیه‌ها، منگنه‌ها و پرچ‌کننده‌ها: در مجلد پیشین (صفحات ۷۶۳ تا ۷۶۷) تفاوتهای قیچی، منگنه و پرچ‌کننده‌های بخاری سال ۱۸۳۶ ساخت آقایان کاوه، فیربرن، آلت، بویژه لوکروز را برشمردیم. در اینجا به ذکر این نکته اکتفا می‌کنیم که دستگاه قیچی کاوه می‌توانست ورقهای آهن به ضخامت ۱۰۰ میلیمتر را در حالت سرد «به آسانی یک ورق مقوا» ببرد. همان‌طور که دیده می‌شود، باید از

کم جلوه دادن قدرت این دستگاههای ماشین سازی اواسط سده نوزدهم پرهیز کرد. ساخت چنین ماشینهایی در آن روزگار بدون استفاده از نیروی بخار هرگز امکان نداشت. می توان سیستمهایی تصور کرد که از ترکیب چرخاب و پرسهای هیدرولیک برای این کار ساخته شده اند. این واقعیت که در آن زمان این ترکیب نمی توانست عمومیت داشته باشد کافی است تا بپذیریم که اجرای آنها در اکثر موارد بسیار دشوار بوده است. در حالت خاص و در موقعیتهای مناسب در کارگاههایی اجرا می شدند که به وسایل انرژی هیدرولیک، کاملاً مجهز بودند. این امر مثلاً در کارگاه آریستید برژس در لانس<sup>۱</sup> فراهم شده بود. همه انرژی لازم برای کارها در آن زمان از طریق ترکیب توربین و جک پیچی تأمین می شد. با این حال، تا سال ۱۸۸۰ بخار به علت انعطاف زیاد کاربرد آن، راه حل عملی آن باقی ماند.

تجهیزات برای کارهای عمومی: برای اینکه هیچ نکته اساسی ناگفته نماند باید از کاربرد بسیار گسترده جراثقالها و لایروبهای بخاری نیز سخنی به میان آورد. وسایل گفته شده علاوه بر کشتیهای بخاری است. در این باره، بویژه در مورد جراثقال، ما مواجه با ماشینهایی هستیم که تا حدودی پیش نمونه آنها مکانیسم لوکوموبیل بوده و ظاهراً از آن نتیجه شده اند.

در مورد تحول بعدی این نوع ابزارها، اطلاع چندانی نداریم. انتقال هیدرولیکی حرکت، هوای فشرده و بالاخره موتورهای برقی، و حتی در مواردی موتورهای درونسوز بتدریج جانشین ماشینهای بخار شدند. ماشین ابزارهای بخاری «با عمل مستقیم» که در عهد امپراطوری دوم، عصر طلایی خود را یافته بودند در حدود سالهای ۱۸۷۸ - ۱۸۸۱ بتدریج برای همیشه از میان رفتند (رجوع کنید به مجلد پنجم، بخش دوم، فصل ۳).

### رگولاتور؛ سرووموتور

ماشین بخار، ساخت و پیشرفت چندین نوع وسیله اطمینان یا فرمان را ممکن ساخت که گرچه مجالی برای بررسی آنها نیست، معمولاً اهمیت زیادی دارند.

رگولاتور (ناظم) وات: دیده شد (مجلد سوم، صفحه ۸۸) که چگونه وات توانست رگولاتور گلوله ای یا رگولاتور مرکزگریز را در ماشینهای دورانی به کار برد. تلمبه های یکطرفه در ابتدا که تنها برای تلمبه زنی آب ساخته می شدند یک رگولاتور جریان داشتند که آن را کاتاراکت می نامیدند، این وسیله با تنگ و گشاد کردن مقطع لوله رابط استوانه با کندانسور عمل می کرد. کاتاراکت در ماشینهای کورنوال هم گذاشته می شد. زمانی که رگولاتور مرکزگریز با ماشینهای دورانی دوطرفه ساخته شد

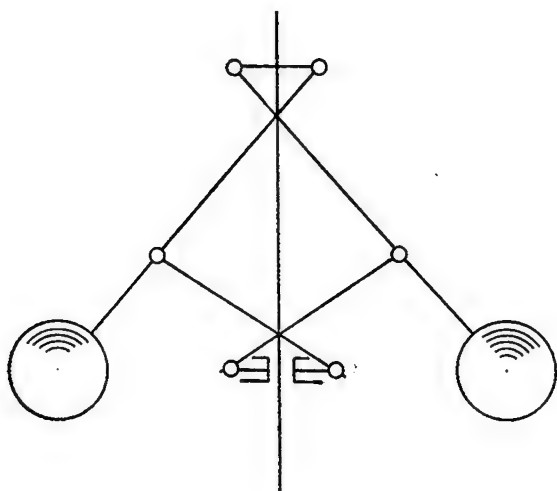
1. Lancey

سوپاپ به لوله ورودی بخار انتقال یافت.

ایزوکرونیزم (ثبوت زمانی): آونگ مخروطی، نامی که به ساخته دستهای آقای وات داده شده بود، یک عیب ساختاری بسیار مهم داشت - هر سرعتی که این آونگ با آن تعادل می‌یافت، یعنی گویها تمایلی نه به پایین آمدن و نه به بالا رفتن داشتند، سرعت کار دستگاه نامیده می‌شد. بدین ترتیب، این گویها با جابه‌جا شدن خود، قوسهایی از دایره تشکیل می‌دادند. نتیجه چنین وضعی این بود که هر قدر گویها بالاتر باشند سرعت کار دستگاه بیشتر است. بنابراین امکانی، لااقل نظری، برای دستگاه حاصل می‌شد که دارای سرعتهای گوناگون باشد. در عمل می‌توان گفت که رگولاتور آقای وات می‌توانست بدون اینکه به تغییرات سرعت، ثبات مطلقی بخشد آنها را محدود کند.

رگولاتوری که سرعت تعادل آن برای همه وضعیتهای گویها ثابت بود دارای ثبوت زمانی خوانده می‌شد. در سده نوزدهم این کیفیت هم مدتی تحت بررسیهای زیادی قرار گرفت. آن را بسادگی با این محاسبه که یک گوی رگولاتور بر روی همه نقاط یک سهمی برای سرعت واحد دارای تعادل خواهد بود، تعیین می‌کردند. فهم این نظریه گرچه ساده است، اجرای آن بسیار دشوار می‌باشد. این وضعیت مشابه موردی است که در نورشناخت پیشنهاد شد عدسیهای غیرکروی ساخته شوند. آقای فرانکه<sup>۱</sup> برای این کار از راهنماهایی استفاده کرد که یک سهمی رسم می‌کرد. آقای فارکو به جای سهمی از دایره بوسان (osculateur) خود در وضعیت میانگین کره‌ها استفاده کرد و رگولاتوری با بازوهای متقاطع ساخت (شکل ۴)؛ راه‌حلی بسیار عالی! اما راه‌حلی که در عمل بیشترین رواج را یافت، پیشنهادی آقای پورتر بود. در این راه‌حل بوشنی وزین در ته لوله رگولاتور نصب می‌شد تا نوعی ثبوت زمانی کم‌وبیش واقعی ایجاد شود با در نظر گرفتن اینکه مسافتی را که لوله طی می‌کرد و برابر جابه‌جایی عمودی گویها بود (شکل ۵).

دانات تنظیم‌پذیر با رگولاتور: مکانیزم رگولاتور تا اواسط سده نوزدهم به همان طریزی که وات انجام داده بود باقی ماند. در این تاریخ اصلاحاتی اساسی بوسیله نوآورانی مانند: فارکو (نخست) و کورلیس (بعداً) در آن وارد شد. زمانی تنظیم‌پذیری دانات عملی شد (در این باره بتفصیل سخن خواهیم گفت)، که تغییرات آن به فرمان رگولاتور قرار گرفت. در رگولاتور تغییرات مناسبی داده شد، بویژه لازم بود سرعت کار خیلی بیش از گذشته باشد تا تأثیر نیرومندتری به دست آید. این اصلاحات گوناگون بودند بخصوص از رگولاتور آرمینگتون نام می‌بریم که در میل‌لنگی با مقدار رفت تنظیم‌پذیر بود، کاری که برای این مشکل راه‌حلی عالی بود (شکل ۶). در نوع مشابهی، رگولاتور لنتس<sup>۲</sup> هم جالب بود. اما خود اصل استفاده از نیروی مرکزگریزی برای ایجاد تأثیر متناسب با سرعت، هیچ‌گاه



شکل ۴. نمای اجمالی یک رگولاتور مرکزگیز با بازوهای متقاطع.

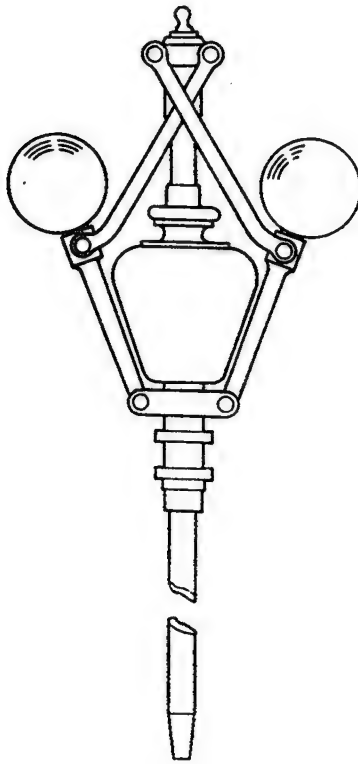
رها نشد.

سروموتور: مکانیسم مهم سروموتور را نمی‌توان نادیده انگاشت، زیرا بستگی نزدیکی با ساخت ماشین بخار و نیز کاربرد آن دارد.

نام فارکو در این مبحث بسیار تکرار می‌شود. باید گفت که در این مورد در برابر ما یک ماشین‌ساز فرانسوی ایستاده است که چه از نظر قدمت و چه از لحاظ شایستگی باید از پیشگامان این کار به‌شمار آید.

ما جز یادآوری پایه‌گذار آن، آقای ماری-ژوزف (۱۷۹۸ - ۱۸۷۵)، که از سال ۱۸۲۳ با پول خود این کار را شروع کرد سخن دیگری نداریم. وی نخستین کسی در جهان بود که مکانیسم دتانت تنظیم‌پذیر بوسیلهٔ رگولاتور را در سال ۱۸۳۶ به ثبت رسانید. دربارهٔ کشوی دتانت که مدال طلا را در سال ۱۸۴۴ برای وی تأمین کرد باید گفت که این کشو از حدود نیم سده پیش از آن در همه‌جا رواج داشت.

ژوزف فارکو (۱۸۲۴ - ۱۹۰۸) شریک اصلی پدر خود بود، سپس در سال ۱۸۵۳ سرمهندس کارخانه شد. کار اصلی وی را می‌توان آماده کردن موتور دانست که بخاطر آن در سال ۱۸۷۶ از

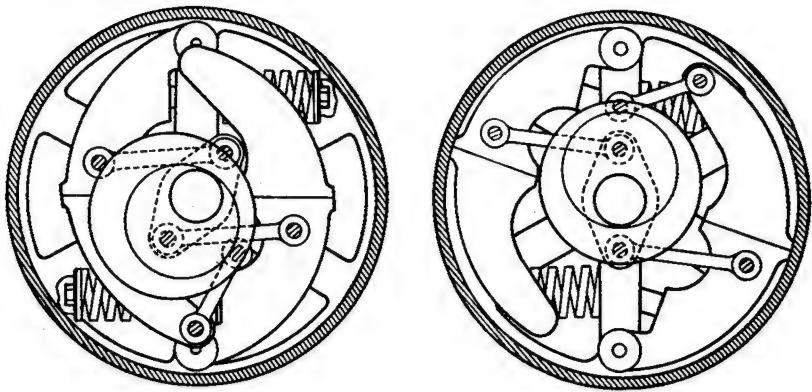


شکل ۵. رگولاتور مرکزگریز با وزنه‌های تعادل و بازوهای متقاطع.

آکادمی علوم فرانسه جایزه پلومی<sup>۱</sup> دریافت داشت.

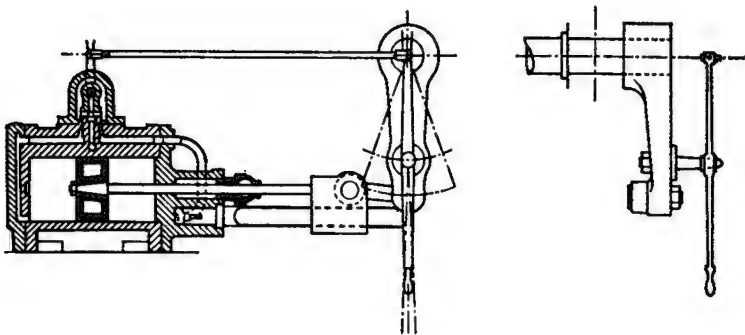
این سیستم در سال ۱۸۶۸ به کار افتاد اما آقای فارکو از طریق نوشته‌ای که در سال ۱۸۷۳ انتشار یافت از این جریان آگاه شد. اندیشه اساسی آن، همان‌طور که معلوم است، به کار گذاشتن یک موتور در وسیله فرمان است تا نیروی لازم برای اجرای یک مانور را به دست آورد. فرمان دقیقاً شبیه فرمان دستی بود، یعنی چیزی که با دست راننده می‌گردید و فرمان آن را انتقال می‌داد. در آرایش اولیه، با جابه‌جایی مناسب کشویی که بخار را در یک سیلندر موتور توزیع می‌کرد، نتیجه این ابتکار به دست آمد (شکل ۷).

1. Plumey



شکل ۶. رگولاتور آرمینگتون: سمت چپ، متوقف؛ سمت راست، در حرکت.

فرمانهای بخاری: سروموتور اصولاً بمنظور مکانیکی کردن فرمان ناوهای عمده ساخته شد. بنابراین، آرایش آن به طوری بود که دوران دستگاه چرخ و طناب را عملی سازد، تا آنکه زنجیرهای هادی سکان دور قرقره پیچیده شوند. بوسیله چرخ دسته دار، که در گذشته به کار می رفت و با بازوی سکاندار می گردید، برای اینکه میله از یک پهلوی به دیگری بگردد چندین دقیقه لازم بود. با وجود



شکل ۷. سروموتور بخاری فارکو.

سمت چپ: مقطعی که پیستون موتور را نشان می دهد.  
سمت راست: نیمرخ محور موتور که حامل اهرم فرمان است.

سکان بخاری تنها یک نفر می‌توانست این کار را در چند ثانیه انجام دهد. اما چرخ دسته‌دار رایج، چنانکه گویی سروموتور وجود ندارد، به‌کار خود ادامه داد، به‌طوری‌که آنهایی که از سکانهای بخاری جدید استفاده می‌کردند به کارآموزی آن هیچ نیازی نداشتند. پیشرفتهای خودکار شدن بر پایه سیستم به خدمتگیری کاربرد عمومی آغاز شد. این کار به‌شکل الکتریکی یا هیدرولیکی، نه با بخار، انجام گرفت؛ اما در مکانیزمی که فارکو یافته بود، که گویا جنبه قطعی داشت، هیچ چیز اساسی تغییر نیافته بود.

### ماشینهای تندکار

تعریف: آیا ماشینهای تندکار، ساختار یا طرز کار جدیدی دارند؟ بررسی آنها نشان می‌دهد که با ساختار جدیدی روبه‌رو هستیم. ماشینهای تندکار از یک‌سوی در واقع از همه روشهای اساسی طرز کار معمول استفاده کرده‌اند: ماشینهای یک‌طرفه، دو طرفه، بدون دلتات، یک انبساطی، چند انبساطی؛ از سوی دیگر باید گفت که ماشینهای تندکار همیشه ساختاری مناسب کار خود داشته‌اند. در ماشینهای کلاسیکی افقی یا عمودی، نسبتها تغییر کرده‌اند: کاهش طول رفت نسبت به گشادی لوله، افزایش سطح؛ البته، حالت جمع‌وجوری ماشین. در موارد دیگر، ساختارهایی دیده می‌شود که گرچه کاملاً جدید نیستند، لااقل آثاری از طرحهای جدید در آنها وجود دارد: روغندان سر بسته، راندن قطعات در روغن، روغنکاری با فشار. تعدد سیلندرها و آرایش ردیفی، مقابل، یا حتی مثلی آنها. همه این خصوصیات ما را ناگزیر می‌سازد که به این ماشینها به چشم ماشینهایی با ساختار جدید بنگریم که بمنظور ایجاد سرعتهای زیاد ساخته شده‌اند.

اما بینیم که تندکاری چیست؟ تعریفهای دقیقی از آن در دست است. منظور گروهی از ماشینها هستند که طی حدود نیم سده، از ۱۸۶۰ تا ۱۹۱۰ اهمیت یافتند. ما این موضوع را کمی بعد توضیح خواهیم داد. طی این مدت هر ماشینی که در دقیقه ۲۰۰ دور یا بیشتر می‌گردید تندکار نامیده می‌شد.

دیده می‌شود که در این تعریف سرعت زاویه‌ای، نه سرعت خطی پیستون، در نظر گرفته شده است. در ماشینهای بزرگ موجود در اواخر سده نوزدهم با طول رفت در حدود ۱/۵ تا ۲ متر، و سرعت دوران ۶۰ تا ۸۰ دور در دقیقه، و سرعت پیستون آنها حدود چهار متر در ثانیه بود. پیستون در اکثر ماشینهای تندکار، تا این اندازه سریع جابه‌جا نمی‌شد. با این حال، ماشینهای بزرگ را هیچ‌گاه تندکار نگفته‌اند. این نامگذاری در واقع مخصوص ماشینهایی است که افزایش سرعت گردش آنها

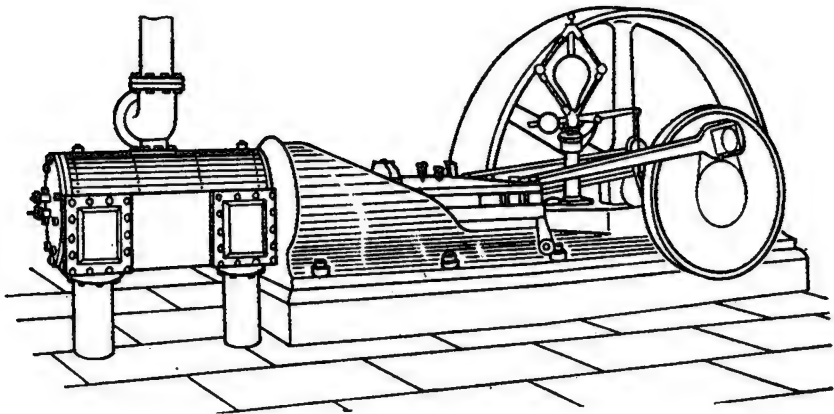


همچون وسیله‌ای برای افزایش قدرت آنها، بدون افزایش وزن به‌کار گرفته شده است. پیشگامان لوکوموتیو: پیشگامان تاریخی ماشینهای تندکار، آن‌طور که بر اساس چند رقم نتیجه می‌شود، لوکوموتیوها بوده‌اند. در سال ۱۸۲۹ لوکوموتیو راکت آقای استیونسن، در حداکثر سرعت خود که ۵۶ کیلومتر در ساعت بود، در مسابقه رینهل به‌طور متوسط ۲۰۹ دور در دقیقه می‌گشت و سرعت پیستون آن ۲/۸۵ متر در ثانیه بود. حدود سال ۱۸۴۶ لوکوموتیو گریت وسترن کوچ برای راه عریض و لوکوموتیو لیورپول از کرامپتن برای راه معمولی، سرعتی برابر ۲۷۵ دور در دقیقه داشتند که سرعت رفت پیستون آنها ۵/۵۰ متر در ثانیه و حدود ۱۲۵ کیلومتر در ساعت بود. بدیهی است که این سرعت در مسابقه بود. اما لوکوموتیوهای کرامپتن فرانسه که در سال ۱۸۴۹ به خدمت گمارده شدند ۲۰۰ دور در دقیقه یا ۸۰ کیلومتر در ساعت، و ۲۵۰ دور در دقیقه یا ۱۰۰ کیلومتر در ساعت سرعت داشتند؛ سرعت پیستون آنها به ترتیب ۴ و ۴/۶ متر در ثانیه بود. در کار عادی روزمره بسرعتی کمتر از اینها هم خشنود بودند. با این‌همه، تردیدی نیست که سرعت زیاد برای نخستین بار با لوکوموتیوها به میدان آمد.

### نخستین ماشینهای رفت و برگشتی (دوطرفه)

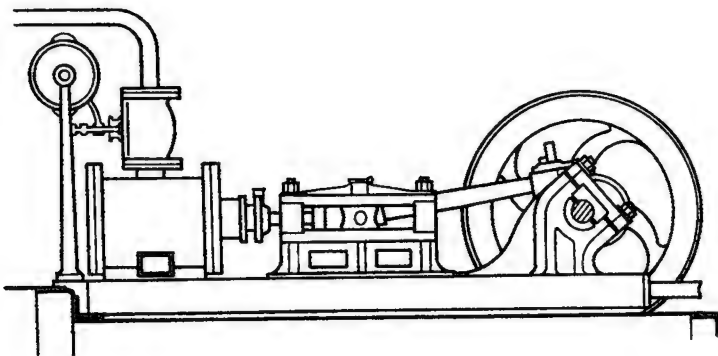
ماشینهای ثابت اولیه و تندکاری که وارد بازار شدند از نوع امریکایی بودند. در سال ۱۸۶۲ در نمایشگاه لندن ماشین بخار پورتر-آلن ارائه شد. این یک ماشین افقی رفت و برگشتی بود با بدنه‌ای قوطی‌شکل و سیلندری پیشامده و معلق. توزیع بخار با چهارکشوی ساخت پیوس فینک<sup>۱</sup> انجام می‌گرفت که لنگی که تنها وصل به دریچه ورود بخار بود بدان فرمان می‌داد. رگولاتور دارای وزنه‌های تعادلی آن، در ۱۸۵۸ طرح شده بود. این ماشین بخار پورتر-آلن مدتها با استقبال روبه‌رو می‌شد (شکل ۸). حدود سال ۱۸۸۵ انواع آن را تا حد ۲۰۰۰ اسب ساختند. اما تنها ماشینهای ۱۵۰ اسب و کمتر می‌توانستند ۲۰۰ دور یا بیشتر بگردند. کوچکترین مدل آن، ۲۵ اسب قدرت داشت و به‌طور عادی ۳۰۰ دور می‌گردید. اما مالکان آن برای افزودن قدرت آن دورش را تا ۶۰۰ بالا می‌بردند و این کار ماشین را خسته نمی‌کرد. موفقیت ماشین پورتر-آلن همچنانکه انتظار می‌رفت، سبب شد که تقلیدکنندگان متعددی به ساخت ماشینهای افقی رفت و برگشتی همت گمارند.

برای اینکه منصف باشیم باید از ماشینهای تندکار فرانسوی معاصر ماشینهای پورتر-آلن نیز سخنی گفته باشیم. این ماشینها ظاهراً بدون ارتباط با ماشینهای پورتر-آلن ساخته شدند؛ تاریخ ساخت آنها این ادعا را ثابت می‌کند. همچنین باید از ماشینهای افقی



شکل ۸. ماشین بخار تندکار پورتر-آلن.

رفت و برگشتی نیز یادی کنیم. آقای فلود ماشین ساز پارسی، آنها را همچون ماشینهای ثابت و مانند لوکوموبیل ساخت (شکل ۹). مدل دارای ۶ اسب قدرت آنها در هر دقیقه  $25^\circ$  دور می گردید و دتانت ثابت آن  $1/4$  بود (ورودی  $75\%$ ). از این ماشینها در سالهای ۱۸۶۱-۱۸۶۲ نام رفته است. به وجود مدلی که در هر دقیقه  $50^\circ$  دور می گردید اشاره رفته و تصریح شده است که آقای لنوار نوع این ماشین را برای موتور گازی خود انتخاب کرد که در همین زمان ساخته بود. با این حال، سرعت معمولی موتور لنوار آن طور که در آزمایشهایی که در سال ۱۸۶۱ آقای ترسکا روی آن انجام داد بین  $10^\circ$  تا  $15^\circ$  دور در دقیقه



شکل ۹. ماشین بخار تندکار فلود.

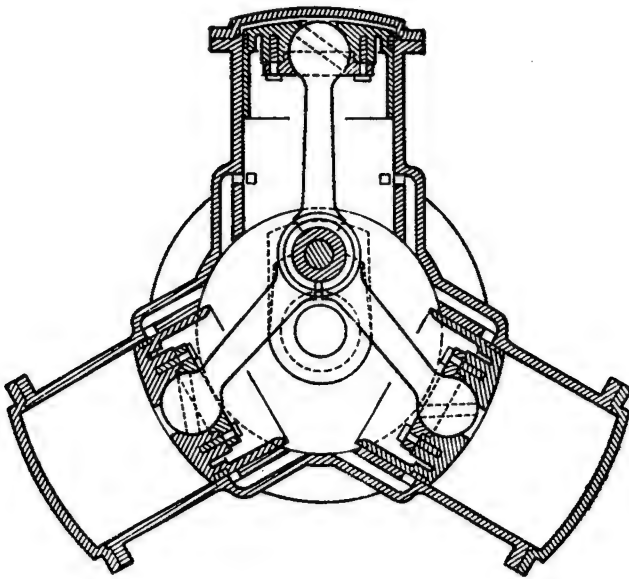
بود. پس از سال ۱۸۷۰ نام فلود فراموش شد و تنها از ماشین امریکایی پورتر- آلن اسم برده می شد.

در همین زمان ماشینهای تندکار دوطرفه (رفت و برگشتی) عمودی هم ساخته می شدند. می توان از ماشین مؤسسه Prager Maschinenbau A.G که آن نیز حدود سال ۱۸۸۵ ساخته شده است به مناسبت مکانیزم جالبش نام برد. بدنه این ماشین دارای مجرای پراز روغن بود که قطعات متحرک در هر حرکت نزولی در روغن غوطه می خوردند.

بازگشت به ماشین یکطرفه: اما دوران ۱۸۷۰ - ۱۸۹۰ دارای این تمایز است که ماشینهای تندکار در برابر ماشینهایی که پس از وات فراموش شده بودند واپس نشستند. تنها استثناء این جریان، تلمبه های کورنوال است. در اینجا ما شاهد پیدایش مکانیزمی واقعاً بدیع و جالب هستیم. صرف نظر کردن از مکانیزم رفت و برگشتی، ساخت سیلندرها را آسان ساخت. دیگر بخصوص به وجود غلافی جهت عبور دسته پیستون (شاتون) نیازی نبود.

ماشین برادرهود<sup>۱</sup> در سالهای ۱۸۷۱ - ۱۸۷۲ ساخته شد و طی ۱۵ سال توسعه فراوانی یافت. این ماشین سه سیلندر یکطرفه با آرایشی مثلثی داشت، - چیزی که کاملاً جدید بود (شکل ۱۰). این ماشین بویژه برای قدرتهای ۱۰ تا ۱۵ اسب با سرعت معمولی ۵۰۰ تا ۶۰۰ دور در دقیقه می گردید. اما طرز کار آن حتی در ۲۰۰۰ دور نیز بسیار ثابت بود. ماشین برادرهود در واقع غولی بخارآشام بود: ۱۸ تا ۲۰ کیلوگرم در هر اسب در ساعت، که تقریباً سه کیلوگرم زغال می شود؛ درحالی که حجمی کوچک داشت. این ماشین با نحوه کار دینامها - جز در بدو پیدایش آن - بخوبی سازگار بود. در زمانهای نخستین روشن سازی با برق، در واقع کمتر نگران صرفه جویی بودند. بدین ترتیب، ماشینهای برادرهود در هر جایی که منبعی از بخار وجود داشت رواج یافت: در کارخانه ها، کشتیها، خود لوکوموتیو. در سال ۱۸۸۵ حدود ۵۰۰ دستگاه از آن در فرانسه کار می کرد؛ قدرت آنها از ۳/۵ تا ۶۰ اسب بود و سرعت آنها به ترتیب از ۱۵۰۰ تا ۴۰۰ دور در دقیقه تغییر می کرد. طول رفت پیستون آنها همواره کمتر از قطر داخلی سیلندر بود؛ در ماشینهای دارای قدرت کم تقریباً با آن برابر، و در ماشینهای پر قدرت حدود دوسوم آن بود.

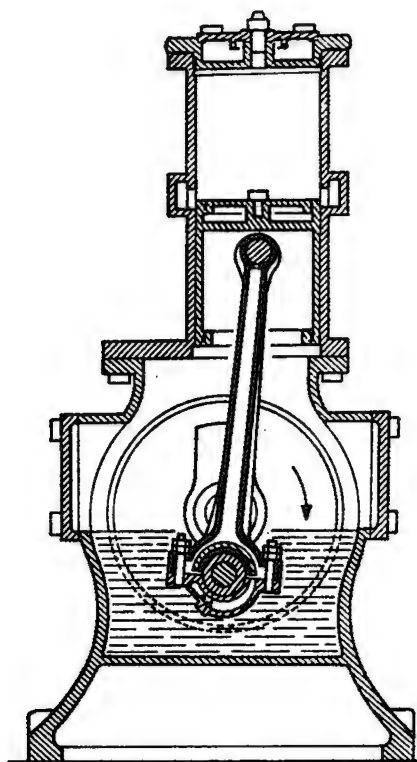
از ماشین برادرهود اقتباس زیادی شد. از آن میان تنها از میان ماشین چارلز الجرون پارسنز، سازنده آتی توربین بخاری نام می بریم. می دانیم که این توربین بمنظور انجام دادن همان کاری ساخته شد که ماشین برادرهود انجام می داد. ماشین پارسنز، سال ۱۸۸۴، چهار سیلندر، دو به دو متقابل داشت که مجموعاً یک علامت به علاوه (+) را تشکیل می دادند اما شاخه های آن در یک



شکل ۱۰. ماشین تندکار براذرهود. مقطع عرضی از محور سیلندرها.

صفحه نبودند. دو پیستون متقابل را یک دسته مشترک به هم مربوط می‌کرد و این شاتون مستقیماً یکی از دو زانویی لنگ را به‌کار می‌انداخت و دسته‌های لنگ حذف شده بودند. این امر سبب می‌شد که گروه چهار سیلندری، حرکتی دورانی با سرعتی برابر نیمی از سرعت محور دستگاه داشته باشد. بدین ترتیب، ما در اینجا با یک موتور با آرایش ستاره‌ای و گردان سیلندرها روبه‌رو می‌شویم، گرچه با موتورهای آتی هواپیمایی از همین نوع، که به موتورهای گردان ستاره‌ای اصطلاح شده‌اند تفاوت‌های زیادی دارند. باید تأکید کرد که این ماشین پارسنز رواجی نیافت.

ماشین تندکار و یکطرفه دیگری که با استقبال فراوان روبه‌رو شد ماشین وستینگهاوس است. این دستگاهی عمودی با دو سیلندر ردیفی، دارای کارتری سربسته در اطراف محور بود. قسمتهای متحرک آن در هر گردش وارد حمامی از آب می‌شدند که لایه‌ای از روغن همیشه روی آن بود (شکل ۱۱). قطر داخلی سیلندر این ماشین برابر طول رفت پیستون آن بود. کوچکترین مدل این ماشین چهار اسب قدرت داشت و ۵۰۰ دور در دقیقه می‌گردید، درحالی‌که بزرگترین آن ۱۱۰ اسب قدرت داشت و در هر دقیقه ۲۸۰ دور می‌گردید. یک ماشین ۷۵ اسبی آن دارای ابعاد



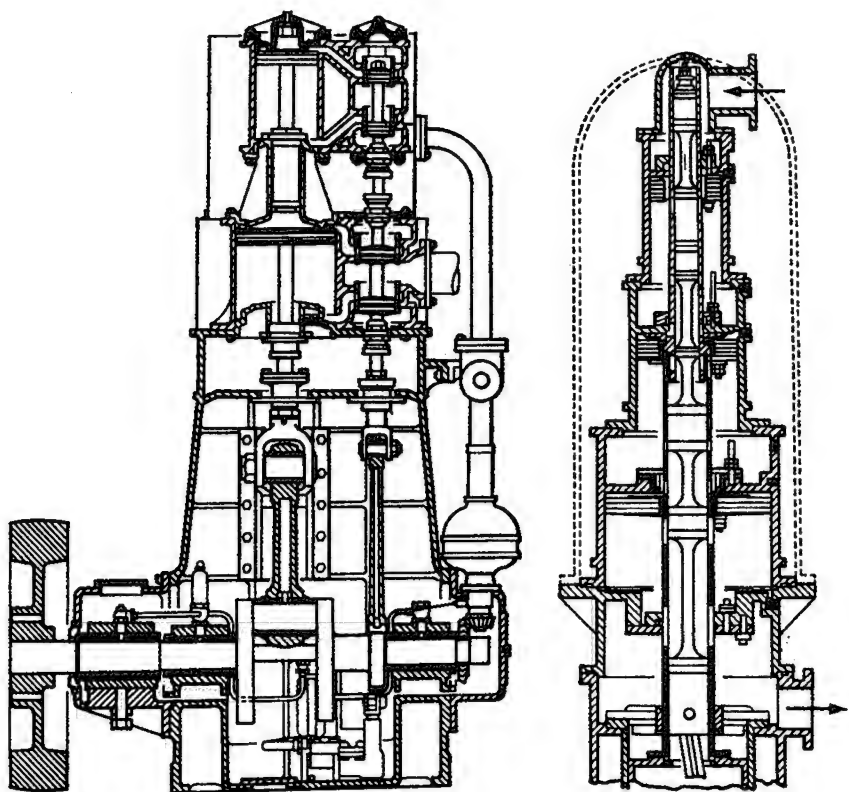
شکل ۱۱. ماشین تندکار وستینگهاوس. مقطع عرضی، کارتر مسدود، حکام روغن.

۲/۲۰ × ۱/۴۰ متر با دو متر ارتفاع بود و ۳/۵ تن وزن داشت. ماشین وستینگهاوس بخصوص برای روشنایی برقی کشتیها مناسب بود و به همین علت آن را با قدرت زیاد برای کشتیهای مسافربری یا پستی می ساختند. این ماشین در سال ۱۸۸۵ در ممالک متحدۀ امریکا رواج تمام داشت، اما در اروپا زیاد شناخته شده نبود. بعدها در همه جا به کار گرفته شد و اقتباسهای فراوانی از آن به عمل آمد. استحکام آن شگفت انگیز بود، آقای امه ویتز در سال ۱۹۱۳ نوشته است که: «یک ماشین ۷ اسبی آن که در هر دقیقه ۷۰۰ دور می زند، بدون اینکه از مه دریا در پناه باشد پنج ماه تمام کار می کند. این ماشین را قشر ضخیمی از نمک پوشانیده است و با این همه روز و شب، تنها با سه وقفۀ ربع ساعتی کار می کند.»

تأثیر ماشینهای یک مرحله‌ای بر نخستین موتورهای انفجاری: در اینجا باید درباره‌ی خویشاوندی دو نوع ماشین تذکاری که شرح آنها داده شد و انواعی از موتورهای انفجاری بسیار مشهور تأکید کنیم. ماشین وستینگهاوس مکانیزمی دارد که بوضوح الهامبخش موتور دایملر، خاستگاه همه‌ی تحولات اتومبیل‌سازی است. نکته‌یابی برای ثبات این ادعا زاید است تنها کافی است که مقطع دو ماشین را برابر هم بگذاریم تا معلوم شود که مدل هر دو یکی است (شکلهای ۱۲ و ۱۳).

در مورد ماشین براذرهود باید گفت که موتور مثلی هواپیما را تداعی می‌کند. این شباهت آن قدر آشکار است که لزومی به اصرار برای اثبات آن نیست؛ گرچه برخی جزئیات با یکدیگر متفاوتند. آقای شارل رنار بخاطر آزمایشهای موفق در مورد بالونهای دیریژابل (قابل هدایت) که در سالهای ۱۸۸۴ - ۱۸۸۵ انجام داده است بسیار سرشناس است. موتوری که در آن زمان به‌کار می‌برد برقی بود. آقای رنار که در سال ۱۹۰۵ مرد گرچه طی بیست سال آخر عمر خود صعودی نکرد لیکن وقت خود را وقف پژوهش درباره‌ی موتور سبک کرده بود. با این حال، وی کوشش خود را روی بخار متمرکز ساخته بود. او می‌خواست موتوری با وزن پنج کیلوگرم در هر اسب بسازد که دو اسب آن به دیگ بخار و سه اسب به موتور مربوط می‌شد. در پنجمین نمایشگاه بین‌المللی فضانوردی در پاریس به سال ۱۹۱۳ یکی از کارهای گذشته او ارائه شد. در این تاریخ موتور ستاره‌ای با سوخت بنزین، حاصل زحمات پیر برتل<sup>۱</sup> و برادران سگن (لویی و لوران) بود، که با عنوان موتور گنوم *Gnome* معروف شد و کاملاً بدیع بود. این امر توجه سازندگان را به پیش‌نمونه‌های رنار جلب کرد. همه این موتورها از نوع براذرهود، اما به‌جای سه، دارای شش یا هشت سیلندر بودند که به حالت ستاره‌ای ثابت، یگانه یا دوگانه بودند، درباره‌ی قدمت آن باید گفت که غالباً از فلیکس میله نقل می‌کنند که در سال ۱۸۸۷<sup>۲</sup> سه چرخها و موتورسیکلت‌های بنزینی ساخته شد که موتور آنها گردان و با آرایش ستاره‌ای بود و در یکی از چرخها جاسازی می‌شد. چنین می‌نماید که این وسایل در پیشرفت به‌سوی موتور گنوم، هیچ نقشی نداشتند. احتمال می‌رود که خود آقای میله از ماشینهای براذرهود الهام گرفته است.

برای اینکه درباره‌ی ماشینهای تذکار یکطرفه سخن را تمام کنیم باید چند کلمه‌ای هم از ماشین ویلنس<sup>۲</sup> در امتیازنامه‌ی نخستین اختراعش در سال ۱۸۸۴ سخن بگوییم. این نوعی ماشین عمودی با سه انبساط بود که روی هر دسته‌ی پیستون آن سه سیلندر روی هم قرار داشتند (شکل ۱۲). هر ماشین به‌طور کلی دارای دو یا سه گروه از این نوع بود که روی یک محور ردیف شده بودند. دسته‌های پیستونها که توخالی و سوراخدار بودند قسمت توزیع بخار را تشکیل می‌دادند. هر دسته



شکل ۱۳. ماشین تندکار بلیس که دلوئه - بلویل آن را ساخته است. ماشین دو انبساطی، دوطرفه، که توزیع بخار در آن بوسیله کشوهای استوانه‌ای صورت می‌گیرد.

شکل ۱۲. ماشین ویلنس با انبساط سه‌گانه: بخار از راه غلافی که تشکیل شاتون پیستونها را داده است از یک سیلندر به سیلندر دیگر سرازیر می‌شود. قطعاتی که به شکل T جفتی هستند کشوهای استوانه‌ای هستند که در این شاتون رفت و آمد دارند.

پیستون دارای یک ردیف کشوهای استوانه‌ای بود که یک مکانیسم مشترک، که خود بوسیله یک صفحه بادامکی مستقر بر یاتاقانگرد میل‌لنگ فعال می‌شد، آنها را حرکت می‌داد. سیلندر دارای فشار زیاد بالاتر از همه بود، زیر پیستونی مخزن میانی بخار بود و بالاخره در زیر آن سیلندر کم فشار قرار داشت. مخزن میانی آخری بین سیلندر کم فشار و کندانسور گذاشته شده بود، تا ارتباط بین این دو ظرف به هیچ وجه مستقیم نباشد. با ۱۵ کیلوگرم بخار مقدار ۶ یا ۶/۵ کیلوگرم برای هر

اسب در ساعت سوخت مصرف می‌شد، که برای یک ماشین تندکار نتیجه خوبی بود. از ماشین ویلنس در مراکز تولید نیروی برق، زیاد استفاده می‌شد. آن را برای قدرتهای از ۴۰ تا ۲۴۰۰ اسب می‌ساختند که قدرت جالبی بود. کوچکترین این ماشین ۷۰۰ و بزرگترین آن ۲۰۰ دور در دقیقه می‌گردید که آن‌هم دستاورد خوبی بود اما دیگر از ماشین پورتر-آلن - ۲۰۰ دور در دقیقه و قدرت ۱۵۰ اسب - دور شده بودیم. ماشین ویلنس را می‌توان در ردیف نخست ماشینهای تندکار سالهای ۱۸۹۰ - ۱۸۹۵ قرار داد.

بازگشت به ماشینهای دوطرفه: در سال ۱۸۹۰ گرایش به ساخت ماشینهای دو طرفه، دیده می‌شود. نشانه آن ثبت اختراع آقای بلیس<sup>۱</sup> ماشین‌ساز در انگلستان است. اجازه ساخت این ماشین در فرانسه را در سال ۱۸۹۷ آقای دلونه - بلویل<sup>۲</sup> به‌دست آورد. این ماشین که تندکار و دو طرفه بود در جریان ساخت، با دشواریهایی روبه‌رو شد که تنها بتدریج و با کمک تجربیاتی که در ساخت ماشینهای یکطرفه به‌دست آورده بودند، رفع شدند. آقای بلیس از سیلندرهایی روی هم قرار گرفته استفاده می‌کرد (شکل ۱۳). گروه ماشینهای ۱۸۰۰ اسب که آقای دلونه - بلویل در نمایشگاه سال ۱۹۰۰ به نمایش گذاشت دارای سه انبساط با چهار سیلندر در دو ردیف بود: یکی پرفشار - کم‌فشار (HP-BP) و دیگری میان فشار - کم‌فشار (MP-BP). سرعت این ماشینها ۲۵۰ دور در دقیقه بود. مهمترین نوآوری که در ماشین بلیس دیده می‌شود وجود سیستم روغنکاری فشاری بوسیله تلمبه‌هایی است که روغن را از مجراهایی که در محور قطعات ایجاد شده بودند به داخل همه مفاصل می‌رسانیدند. یک بازده ۹۲٪ برای یک ماشین ۳۰۰ اسب ثبت شده است. یادآور می‌شویم که این رقم، نسبت قدرت ارزیابی شده است، یعنی از کار بخار روی پیستون، و قدرت حقیقی، که با مهار محور ماشین تعیین می‌شود به‌دست می‌آید. مؤسسه فرانسوی دیگری به نام بولت - لاربودیر<sup>۳</sup> با الهام از بلیس، به ساخت نوعی ماشین تندکار دست زد. اما این ماشین - با داشتن نوعی تلمبه روغنی جدید، بسیار ساده و کارآمد، بدون شیر، با سیلندری نوساندار و پیستونی که یک مکانیزم لنگ آن را مستقیماً می‌کشید - شهرتی به‌هم رسانید. نمونه ۱۵۰ اسبی آن که ۹۰۰ دور می‌زند تنها ۶۰۰ کیلوگرم، یعنی برای هر اسب، چهار کیلوگرم وزن داشت (دیگ بخار به حساب نیامده است).

اما ماشینهای تندکار بخار آینده‌ای نداشتند. گستره واقعی کاربرد آن در نیروگاههای کوچکی بود که برای روشنایی، بدون در نظر گرفتن هزینه، تأسیس می‌شدند. این نوع مؤسسات مدت زیادی نپاییدند. طولی نکشید که تکثیر نیروگاههای بزرگ، کاربرد ماشینهای تندکار را محدود ساخت. این

1. Bellis 2. Delaunay-Belleville 3. Boulte-Larbodière



نیروگاهها گرفتار رقابت پیروزمندانه توربینها برای قدرتها زیاد، موتورهای برق و موتورهای درونسوز برای قدرتهای کمتر شدند.

حدود سال ۱۹۱۴، ماشینهای تندکار آشکارا در سراسیمه زوال بودند. هیچگاه نتوانستند هزینه آن را تا آن اندازه پایین آورند تا ادامه کار آن ممکن باشد. با این همه معتقدیم که نقش تاریخی جالبی داشته است زیرا محققاً راه ساخت موتورهای انفجاری را گشوده است. چنانچه این ماشینهای محکم و تندکار که با وظایف دیگری هم می شد آنها را سازگار کرد وجود نداشتند موتورهای انفجاری طی سی سال پایانی سده نوزدهم بدین سرعت پیشرفت نمی کردند.

### لوکوموتیوها

آقای آندره شاپلون در سال ۱۹۳۸ درباره لوکوموتیوها قضاوت درستی کرده است. وی گفته است: «استقبال شگفت انگیزی که لوکوموتیو از ابتدای اختراع با آن روبه رو شد، در تاریخ تکنیک پدیده‌ای بسیار خاص و حتی استثنایی است. این صنعت چه از لحاظ اصول کار کرد و چه از نظر شکل تکامل پیوسته عجیبی داشته است.» این داوری در زمانی بیان شده است که لوکوموتیو بخاری تقریباً به پایان تاریخ خود رسیده است. با اینکه لوکوموتیوهای بخاری پس از گذشت ۳۵ سال از ۱۹۳۸ هنوز به کار خود ادامه می دهند، در واقع باید پذیرفت که با آغاز جنگ جهانی دوم دوره نوآوری آنها به پایان رسیده بود.

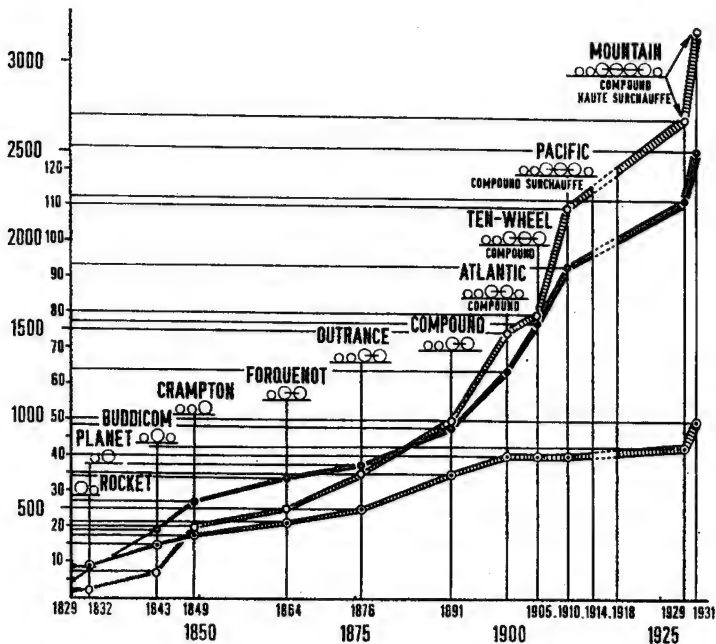
خصوصیات کلی تحول آنها: روشن است که بالا رفتن پیوسته قدرت واحدها تعیین کننده نوع تحول لوکوموتیوهای بخاری است. این بالا رفتن قدرت، مستلزم زیاد شدن ابعاد، یعنی وزن و نیز زیاد شدن فشار کاری دیگر بخار است؛ عامل اخیر باعث افزایش توان جرمی، یعنی تعداد اسب بخار در هر تن جرم ماشین است.

می توان همه اینها را با ارقام مشخص کرد. نمونه هایی که در زیر می آیند، تنها مربوط به لوکوموتیوهای تندکار می شوند، نمونه های جالبی هستند زیرا همه محدودیتها در اینجا جدیتر از لوکوموتیوهای باری است و آقای شاپلون قدرت لوکوموتیو راکت استیونسن در سال ۱۸۲۹ را ۲۵ اسب تخمین می زند. این لوکوموتیو برای وزن ۴/۲۵ تنی و فشار ۳/۵ اتمسفری است. بلافاصله پس از آن، ماشین پلانت از همان سازنده به بازار آمد و برای نخستین بار لوکوموتیوهایی ساخته شدند که در تمام تاریخ لوکوموتیوسازی بدون تغییر باقی ماندند. آقای زاگ آرمنگو در سال ۱۸۶۲ چنین نوشته است: «این نوع لوکوموتیو به نظر ما نقطه شروع واقعی ساخت لوکوموتیوهای جدید

است که می‌توان گفت تمام اسکلت‌بندی را، بجز دستکاریهای جزئی و اصلاحات متعددی که برای افزایش قدرت و تنوع کاربرد سیستمهای تازه وارد شده‌اند داراست.» این سخنان که سی سال پس از پیدایش نوع پلانت نوشته شده‌اند امروز هم ارزش خود را از دست نداده‌اند. وزن این ماشین به هشت تن و قدرت آن به ۵۰ اسب رسیده بود، اما فشارکاری دیگ بخار همان است که بود. آقای شاپلون قدرت لوکوموتیو بودیکوم<sup>۱</sup> را که از سال ۱۸۴۳ در خط پاریس - روان حرکت می‌کرد، ۱۵۰ اسب تخمین زده است. وزن این لوکوموتیو به ۱۹ تن و فشارکاری دیگ بخار به شش اتمسفر رسید. شش سال پس از آن، لوکوموتیوهای پر آوازه کرامپتن<sup>۲</sup> ساخته شدند که نخست در خط پاریس - لیل حرکت می‌کردند. این ماشین بدون اینکه فشار زیادی احساس کند ۱۰۰ کیلومتر در ساعت سرعت داشت؛ قدرت آن ۵۰۰ اسب، وزن ۳۴ تن و فشارکاری دیگ آن ۷ اتمسفر بود. طی ۲۰ سال پیشرفت در لوکوموتوسازی شگفت‌انگیز بود. این دوره‌ای افسانه‌ای است. نیمه دوم سده نوزدهم، تنها صرف تحکیم دستاوردهای پیشین شد (شکل ۱۴). در سال ۱۸۶۴ ما با لوکوموتیو فورکنو<sup>۳</sup> برمی‌خوریم که ۵۰۰ اسب توان و ۳۴ تن وزن داشت. فشارکاری دیگ این لوکوموتیو ۵ و ۸ اتمسفر بود. در سال ۱۸۷۶ لوکوموتیو نوع اوترانس<sup>۴</sup> به بازار آمد؛ قدرت آن ۷۰۰ اسب، وزن ۳۷/۵ و فشار کاری دیگ به ۱۰ اتمسفر رسید. تا این زمان در قسمت توان جرمی لوکوموتیو تحول چشمگیری ایجاد نشده بود، اما در سال ۱۸۸۰ وضع تغییر یافت. در حقیقت استفاده از دیگ بخار فولادی، مقدار فشار را به‌طور جهشی بالا برد. در سال ۱۸۹۱ مقدار فشار در لوکوموتیو معروف کومپوند<sup>۵</sup> شرکت نور<sup>۶</sup> معروف به DuBousquet-de-Glehn به ۱۴ اتمسفر رسید. وزن این لوکوموتیو ۴۸ تن و قدرت آن ۱۰۰۰ اسب بود.

از این تاریخی که بدان رسیده‌ایم به بعد، حدود ۴۰ سال، تحول در این رشته از نو سریع شد. یک ماشین آتلانتیک سال ۱۹۰۰ قدرتی برابر ۱۵۰۰ اسب و وزنی برابر ۶۴ تن داشت؛ فشارکاری دیگ آن ۱۶ اتمسفر بود. تا مدتی ازدیاد فشار بخار آهسته بود. در سال ۱۹۰۵ ما شاهد پیدایش لوکوموتیو تن - ویل<sup>۷</sup> هستیم که نخستین نمونه ماشینهای تندکار با سه محور زوجی است. قدرت این لوکوموتیو ۱۶۰۰ اسب، و وزن آن ۷۷ تن بود؛ اما فشارکاری دیگ آن اضافه نشده بود. پنج سال بعد، در سال ۱۹۱۰ لوکوموتیو پاسیفیک ساخته شد که آینده درخشانی داشت؛ فشارکاری دیگ آن همیشه ۱۶ اتمسفر بود. قدرت این لوکوموتیو ۲۲۰۰ اسب بود - حدنصابی جالب - و وزنش هم زیاده‌تر، و به ۹۳ تن رسیده بود. متذکر می‌شویم که این نوع لوکوموتیو که در سال ۱۸۹۲ در

1. Buddicom 2. Crampton 3. Forquenot 4. Utterance 5. Compound 6. Nord  
7. Ten-Wheel



شکل ۱۴. نمودار اجمالی تحولات لوکوموتیوهای بخاری از ۱۸۲۹ تا ۱۹۳۱ رقمهای درشت در محور عمودی قدرت رسمی را به اسب می‌دهند (منحنی بالایی هاشوردار). رقمهای ریز در محور عمودی وزن لوکوموتیوها با ظرفیت پر به تن می‌باشند (منحنی میانی با خط پر). منحنی هاشوردار پایینی فشارکاری دیگر را به کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌دهد. مقیاس فشارها با مقیاس وزن در رابطه  $1/205$  (۲۰ کیلوگرم برای ۵۰ یا ۱۶ کیلوگرم برای ۴۰ تن) متناسب است

ممالک متحده امریکا ساخته شده بود در سال ۱۹۰۰ در آن سرزمین رواج کامل داشت. اما تنها در سال ۱۹۰۷ بود که در فرانسه نخستین لوکوموتیو پاسیفیک به کار افتاد و سه سال پس از آن ۲۰۰ دستگاه از آن در خطوط فرانسه حرکت می‌کردند.

لوکوموتیوهای نوع مونتین<sup>۱</sup> مانند لوکوموتیوهای پاسیفیک تبار امریکایی داشتند. این نوع لوکوموتیو در سال ۱۹۱۲ در ممالک متحده امریکا ساخته شد، اما تا پایان جنگ جهانی نخست در اروپا مورد استفاده قرار نگرفت. کاربرد زیاد آن در سال ۱۹۲۵ در اسپانیا بود. در فرانسه در سال ۱۹۲۵ شرکتهای EST و PLM نمونه‌های اولیه آن را وارد شبکه کردند. مدل سال ۱۹۲۹

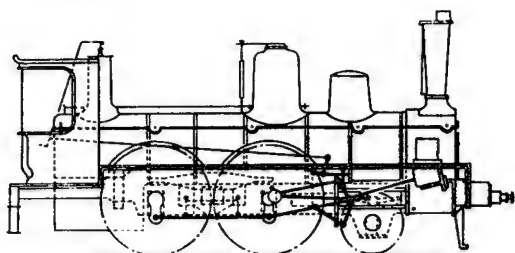
1. Mountain

آن دارای ۲۷۰۰ اسب قدرت و ۱۱۲ تن وزن بود درحالی که فشار کاری دیگر آن از لوکوموتیوهای پیش گفته شده کمی زیادت، یعنی ۱۷ اتمسفر، بود. حدود سال ۱۹۳۰ یک رشته تغییر شکلهای سنجدیه در مدل‌های مورد استفاده در شبکه‌های بزرگ راه‌آهن وارد شد. در سال ۱۹۳۱ یک لوکوموتیو مونتین با وزن ۱۲۵ تن اما با فشار کاری دیگر ۱۲۰ اتمسفر، قدرتی نزدیک به ۳۲۰۰ اسب داشت (شکل ۱۵).

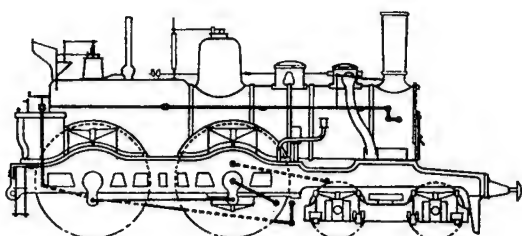
می‌توان با ارائه چند رقم مشخص‌کننده توان گرمی - قدرت بر وزن به تن - به شمارش این تحولات ادامه داد: ۵/۹ برای لوکوموتیوراکت در ۱۸۲۹؛ ۱۴/۸ برای کرامپتن در ۱۸۵۰؛ ۲۰/۸ برای کومپوند در سال ۱۸۹۱ و بالاخره ۲۵/۴ برای مونتین در ۱۹۳۱.

محدودیت‌های ویژه: از این بیشتر درباره لوکوموتیوهای بخاری سخن نمی‌گوییم. تنها یک نکته مهم را یادآور می‌شویم. همه می‌دانند که عرض معمولی ریلها از آنچه که در آغاز معین شده بود عملاً تغییری نیافت. بنابراین لوکوموتیوها تنها در دو جهت می‌توانستند بزرگ شوند: در طول، که افزایش اصلی در این جهت ایجاد می‌شد، در ارتفاع، که افزایش بعد، گرچه به‌طور محدود، امکانات قابل توجهی برای بزرگ شدن مقطع دیگهای بخار، زمانی که جرأت این کار را یافتند، تأمین می‌کرد. در واقع تا مدت‌ها بدون چون و چرا قبول داشتند که گرانیگاه ماشین باید تا حد امکان پایینتر باشد - عقیده‌ای که موجب شد دیگر بخار را در پایین، بین چرخهای متحرک قرار دهند، بنابراین، ابعاد آن شدیداً محدود می‌شد. وضع اکثر لوکوموتیوهای قدیمی چنین بود. اما مهندسان بزودی جسارت ورزیدند و ادعا کردند که بر خلاف پیش‌بینیها، بالا بردن گرانیگاه، هیچ اشکالی ایجاد نخواهد کرد. بدین ترتیب، بدنه‌های استوانه‌ای به نسبت‌های زیادی افزایش یافتند. حدود سال ۱۹۰۷ بدنه دیگر بخار در اروپا دارای ابعاد ۱/۵ تا ۱/۶ و در امریکا ۱/۸ تا ۱/۹ متر بود. در سال ۱۹۳۸ در اروپا ۱/۸ تا ۱/۹ و در امریکا ۲/۴ تا ۲/۶ متر بود. حتی گاهی هم، به‌علت گشاد شدن قالب در امریکا، از این هم بزرگتر می‌شد.

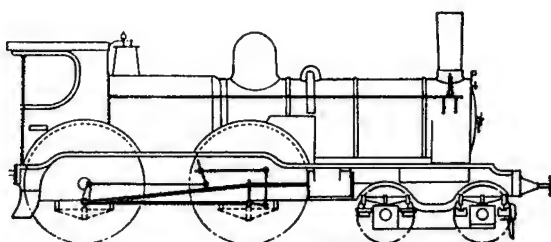
جنبه‌های گوناگون: درباره جنبه‌های خاصی از تحول لوکوموتیوها به‌عنوان ماشینهای بخار در صفحات آینده اطلاعاتی خواهیم یافت: توضیح خواهیم داد که چرا داغ کردن بخار در پوشه بخاری روی این ماشینها ترجیح داده شد (صفحه ۹۲). ما در جای خود منشأهای عمل پیشامدگی کشو و کاربرد پوشش لبه‌های محفظه بخار را باز خواهیم نمود (صفحه ۱۰۰). ما نقشی را که این ماشینها در یافتن مکانیسمهای ویژه ایجاد تنظیم‌پذیری دتانت داشته‌اند خواهیم گفت؛ مکانیسمی که پیدایش وسیله‌ای را موجب شد که کاربرد بسیار گسترده‌ای یافت، مثل دریچه کشویی استیونسن



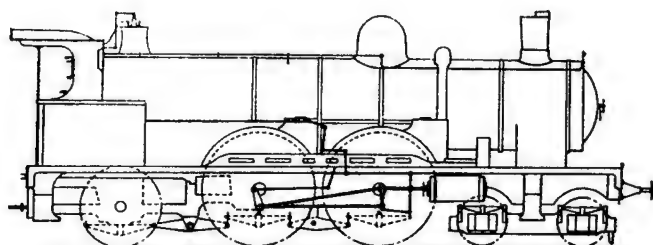
*Forquenot, 1864*



*Utterance, 1876*

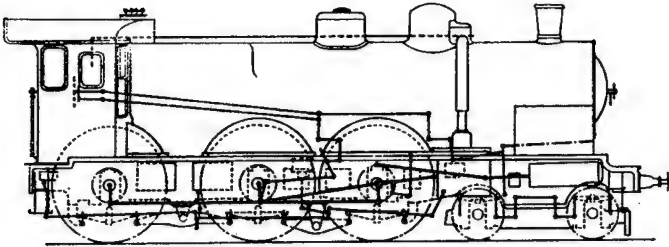


*Compound, 1891*

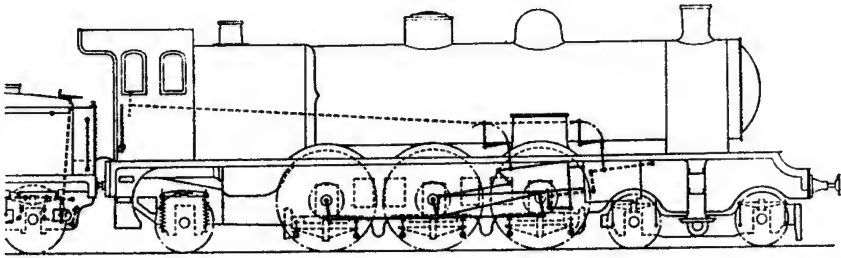


*Atlantic, 1900*

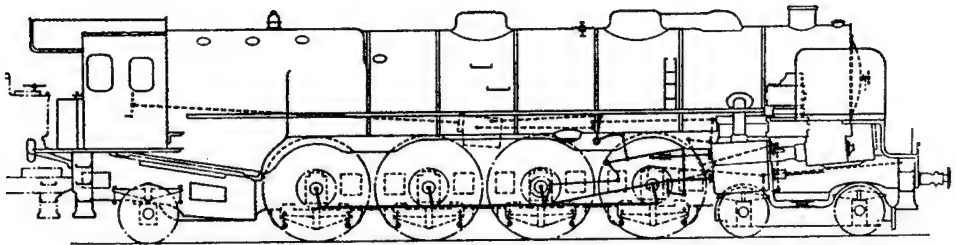
شکل ۱۵. شکل اجمالی لوکوموتیوهایی که در نمودار پیش مشخصات آنها داده شده است. (۱۸۶۴ - ۱۹۳۱).  
همه لوکوموتیوها با یک مقیاس رسم شده‌اند.



Ten-Wheel, 1905



Pacific, 1910



Mountain, 1931

### شکل ۱۵. ادامه

(صفحه ۱۰۱). ما جای آنها را در لوکوموتیوهای ترکیبی، آنجا که تاریخ انبساط چندگانه را باز می‌نماییم، نشان خواهیم داد (صفحه ۱۱۸)؛ و از یادآوری پیش‌نمونه‌های دیگ بخار لوله دودی، قضیه‌ای که مورد نزاع است، غفلت نخواهیم ورزید (صفحه ۱۶۱). سرانجام متذکر می‌شویم که در بالا از لوکوموتیو به عنوان مقدمه تاریخی ماشینهای تندکار یاد کرده‌ایم (صفحه ۴۹).

## ماشین بخار کشتی

در مجلد دوم (صفحات ۴۶۰ تا ۴۶۶). دربارهٔ ماشین بخار کشتی مختصری گفته شد. برای اینکه تحول این ماشینها را تا به آخر نشان دهیم باید به این موضوع بازگردیم.

ماشینهای شاهنگی جانبی: دیده شد که قدیمیترین کشتیهای بخاری مانند وسایل چرخدار حمل و نقل مجهز به ماشینهای کم فشار بودند. تقریباً همهٔ این ماشینها مانند ماشینهای ثابت آن روزگار از نوع شاهنگی بودند، اما شاهنگ آنها در قسمت پایین وسیله قرار داشت تا گرانگاه در پایین قرار گیرد و کشتی از ثبات خوبی برخوردار باشد. مکانیسم ماشینهای بخار شاهنگی در رابطه با ماشینهای استیونس بنفصیل شرح داده شده است (رجوع کنید به مجلد سوم صفحات ۴۴۵ تا ۴۴۸). مشخصات اصلی آن را به خاطر آوریم: دو شاهنگ جانبی در دوسوی ماشین به طرف بیرون از آن قرار داشتند؛ دسته‌های آویزانی از یک بازوی متصل به شاتون، شاهنگها را هدایت می‌کردند. دسته بزرگ از پایین به بالا عمل می‌کرد و ته آن روی پلی اهرم شده بود که سرهای شاهنگها روی آن قرار داشتند.

ماشین با شاهنگ پایین حدود نیم سده مورد توجه بود. این ماشین بسیار حجیم (گفته می‌شود تا ۲۴۰ کیلوگرم برای هر اسب)، و کارش بسیار آرام بود و قطعاتش بسیار مستحکم. زوال کشتیهای چرخدار کاملاً تدریجی بود. حدود سال ۱۸۸۵، چهل سال پس از کاربرد پروانهٔ کشتی سازان هنوز گاهی چرخهای پره‌دار را برای مواقعی که کشش بسیار ضعیف آب لازم بود، به‌کار می‌بردند. از برخی کشتیهای بزرگ تجارتي نام برده شده است که از مانش گذشته‌اند، و کشتیهایی پستی ایرلندی که بین کینگستاون<sup>۱</sup> و هالیهد<sup>۲</sup> رفت و آمد داشتند و نیز کشتیهای توپدار فرانسوی که در رودخانه‌های تونکن خدمت می‌کردند.

ماشینهای دیگر کشتیهای چرخدار: همچنین انواع دیگری از ماشینهای بخار مخصوص کشتیهای چرخدار در کار بودند که در بعضی از آنها اتصال بلاواسطه‌ای وجود داشت، یعنی بمنظور کاستن از دست و پاگیری و وزن زیاد ماشین، قسمت شاهنگ حذف شده بود.

ماشینهای عمودی با شاتونهای مستقیم را آزمایش کردند. سیستمی که بسیار ساده بود اما طول کافی برای بازو را تحمل نمی‌کرد، عیبی که به آرامی کار آن لطمه می‌زد (رجوع کنید به شکل ۸۹ مجلد سوم، صفحهٔ ۴۶۵).

در ماشین بخار ناقوسی، وضع سیلندر تغییری نکرده است، اما اشکال در جهت دیگری منحرف شده است: شاتون حامل مثلثی است که لنگ محور چرخها را احاطه کرده است؛ ته باز و به نوک

این مثلث اهرم شده و سر بازو به لنگ اتصال یافته است.

بعداً ماشینهای جناغی ساخته شدند که دو سیلندر به شکل ۸ بسیار باز داشتند. این حالت بسیار مناسب و تا مدتها متداول بود. بیشتر ماشینهای رونتگن که پیشاهنگ هلندی ماشینهای دو انبساطی - که بعدها درباره آنها سخن خواهیم گفت - بود از نوع ماشینهای جناغی بودند.

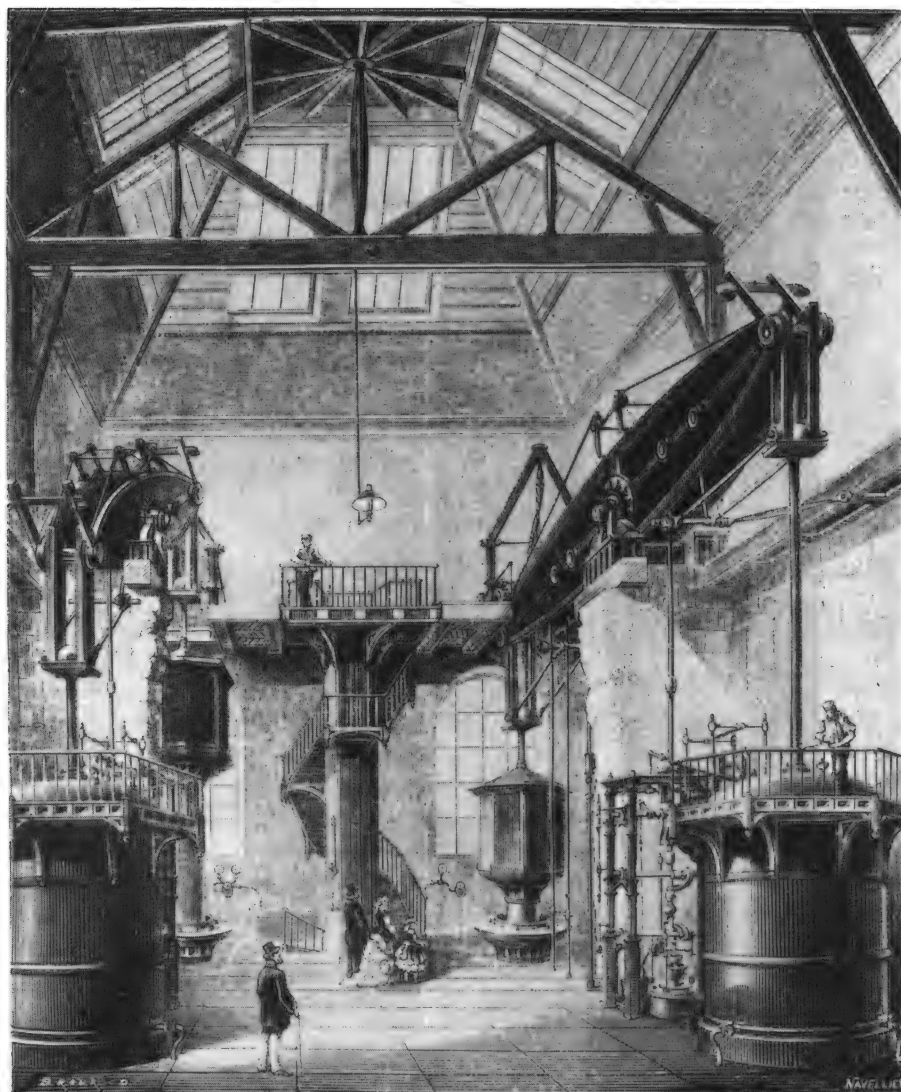
اما ماشین بخاری که بیشترین موفقیت را داشت، از نوع نوساندار بود. ماشینهای نوساندار که به شکل ماشینهای ثابت وارد بازار شدند با ابتکار جان پن، یکی از سرشناسترین ماشین سازان انگلیس، در کشتیهای بزرگ کار گذارده شدند. چون بازو در این ماشین حذف شده بود سیلندر به آسانی در زیر محور کشتی جای می گرفت و کمی حجم ماشین، نواقص آن را می پوشانید. حدود سال ۱۸۸۵ ماشین نوساندار هنوز در آخرین کشتیهای چرخدار، بویژه کشتیهایی که در کانال مانس آمدرافت داشتند، در کار بود (رجوع کنید به شکل ۸۸ جلد سوم، صفحه ۴۶۴).

ماشینهای کشتیهای پروانه دار: از سال ۱۸۴۵ کاربرد پروانه در کشتیها رو به افزایش گذاشت. از این پس محور موتور به درازا در بدنه کشتی و در پایین کار گذاشته شد، درحالی که در کشتیهای چرخدار در پهنای کشتی و در بالا قرار داشت. وانگهی پروانه، این پیشبرنده جدید، نیاز سرعت دوران بسیار بیشتری داشت. در مجلد پیش، ماشینهای مشابه ماشین کشتیهای چرخدار توضیح داده شدند؛ اینها یک چهارم دور در صفحه کشتی نوسان داشتند و یک جعبه دنده چند برابرکننده سرعت، بدانها متصل کرده بودند. بدیهی است این یک راه حل زودگذری بود و بزودی انواع خاصی از این ماشینها وارد عمل شدند.

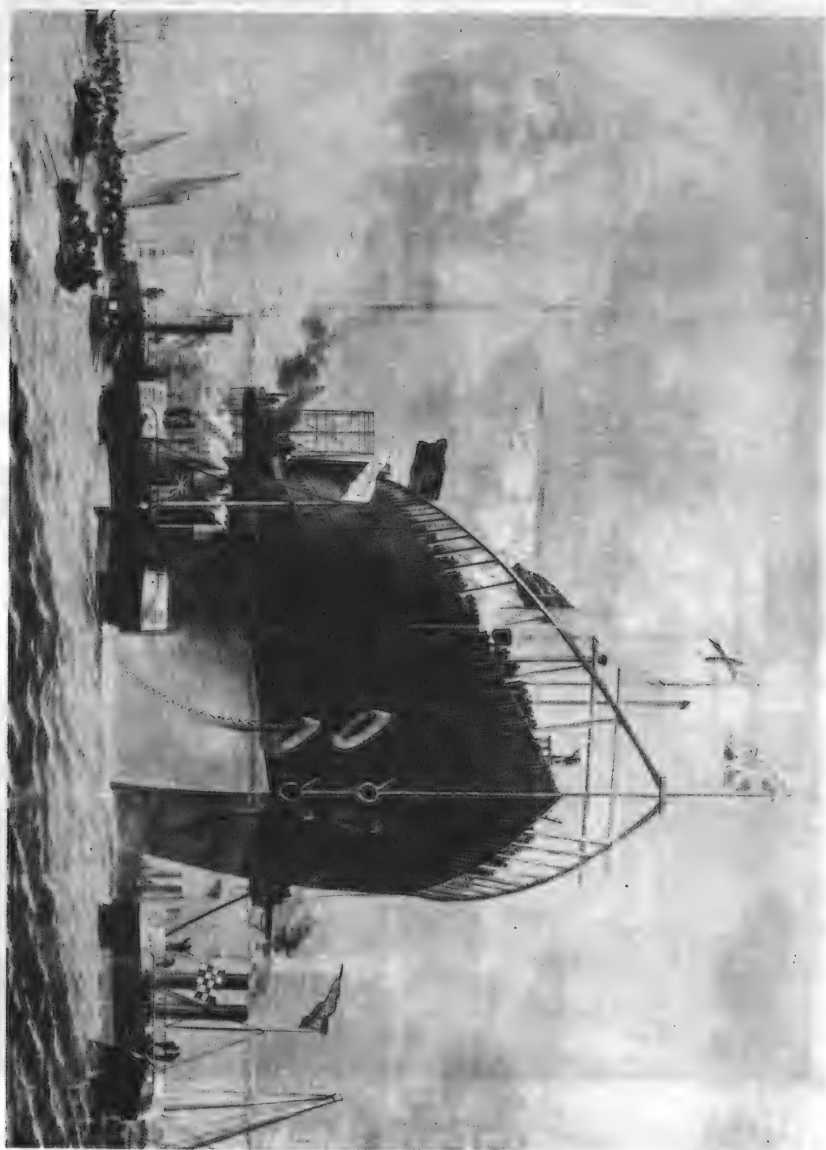
بمنظور ساده کردن مکانیسم این ماشینها، چند نوع ماشینهای افقی با بازوی مستقیم و با قرار دادن چهار سیلندر متقابل مورد آزمایش قرار گرفتند. با این کار به نامناسب بودن بازوهای بسیار کوتاه پی بردند، این نکته در بحث در فرصت ماشینهای عمودی، مانند ماشینهایی که در کشتیهای چرخدار به کار گرفته شده بودند، گوشزد شد.

ماشین جعبه ای: این نوع ماشین را آقای جان پن اختراع کرد. در این ماشینها سیلندر به طور افقی کنار لبه کشتی قرار دارد. سیلندری توخالی که میله ای در داخل آن به پیستون عمود می شود و به جای شاتون عمل می کند و بنابراین نوعی ماشین بدون شاتون است که امکان رفت و برگشت در آن محفوظ مانده است (شکل ۱۶). مکانیسم این ماشین بسیار ساده بود: طول بازو به آسانی می توانست شش برابر شعاع لنگ ماشین باشد، که اصلاح خوبی بود. اما سطح جعبه ماشین قدرت خنک کنندگی چشمگیری داشت، کاسه نمدهای آن آب بندی بدی داشتند و سیلندرها قطرشان بزرگ

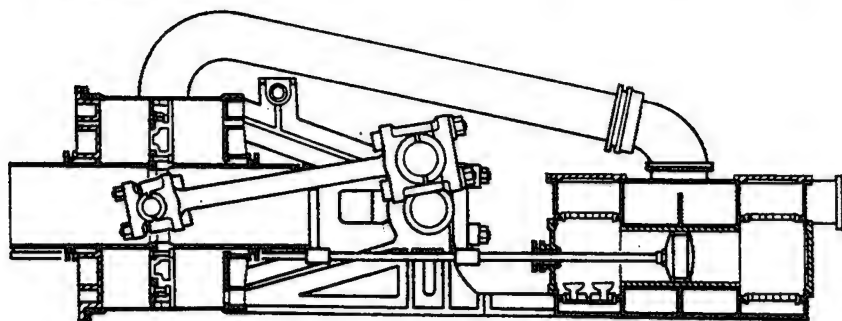




تابلوی ۱. تلمبه آتش‌نشانی در شایو ۱۸۵۳ - ۱۸۵۲



تابلوی ۲. کشتی باری اقیانوس‌پیمای گریت ایسترن ۱۸۵۸.

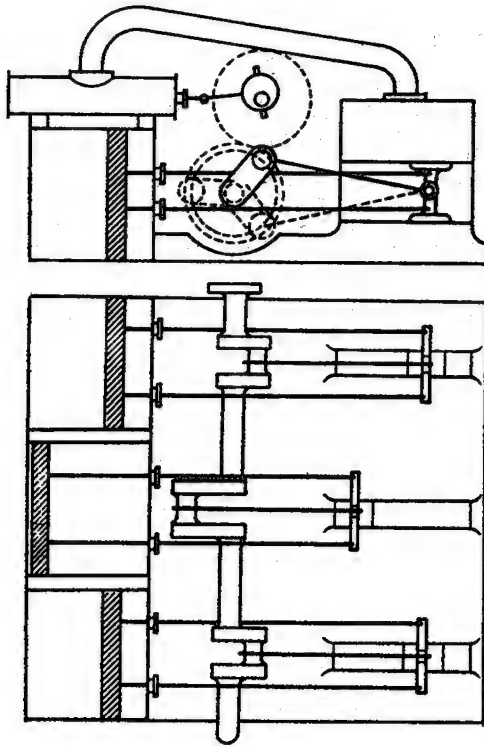


شکل ۱۶. ماشین جعبه‌ای کشتیها، نمای عرضی کشتی. در میانه: محور پروانه؛ در چپ: سیلندر؛ در راست: کندانسور.

شده بود. معذک این ماشین جعبه‌ای در کشتیهای انگلیسی رواج بسیار یافته بود. ماشین با شاتون گردان: در فرانسه ماشینهای دارای شاتون گردان به احترام دریاسالار دوپوی دو سوم و مازلین<sup>۱</sup> اهل لوهاور ترجیح داده شدند. در این نوع ماشین، سیلندر به طور افقی کنار یک لبه کشتی گذاشته می‌شد. دو میله موازی، که از محور فراتر می‌رفتند به پیستون وصل می‌شدند. مفصل شاتون روی پلی قرار داشت که سرهای این دو میله را به یکدیگر متصل می‌ساخت (شکلهای ۱۷ و ۱۸). دو سیستم پیشین نقایص مشترکی داشتند: ماشین خیلی توی هم رفته بود و دسترسی به قطعات مختلف آن دشوار؛ بنابراین اداره و تعمیر آن بسیار سخت انجام می‌گرفت. سیلندرها که افقی بودند احتمالاً در زیر بار پیستونها تخم‌مرغی می‌شدند؛ این تخم‌مرغی شدن که همان‌طور که دیده شد در مورد ماشینهای ثابت افسانه‌ای بود، در مورد ماشینهای بخار کشتی به علت ابعاد بسیار بزرگی که داشتند واقعیت داشت.

ماشین هاونی: اما این نوع ماشین بخار، که بالاخره در کشتیها به کار گرفته شد ماشینی نبود که ویژه کشتیها طرح شده باشد. در واقع ماشین بخار ویژه کشتیها، ماشین هاونی است که، همان‌طور که در گذشته دیدیم، یکی از دو نوع اصلی ماشین بخار ثابت - از ردیف ماشینهای پیستوندار را تشکیل می‌دهد. ما همچنین گفتیم که این نوع ماشین برای موتورهای بزرگ پیستونی آن روزگار، که دیزل بودند، تنها ماشین رایج بود. در کشتیها ماشین دیگری به کار گرفته نمی‌شد. نوع هاونی در سالهای پس از ۱۸۷۰ در کشتیهای بخاری متداول شد. علت این امر افزایش فشارها در آن زمان بود. نه ماشینهای دارای شاتون برگشته و نه مطلقاً ماشینهای جعبه‌ای نمی‌توانستند فشارهای جدید را

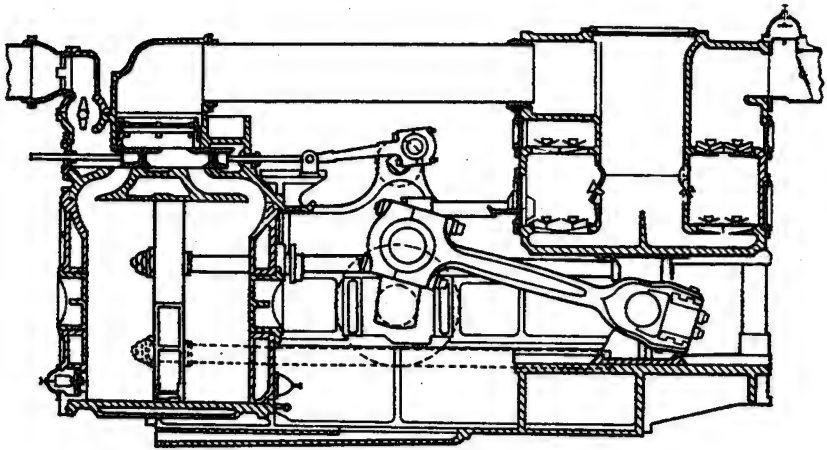
1. Mazeline



شکل ۱۷. ماشین کشتی با شاتون گردان.  
در بالا: مقطع عرضی کشتی؛ در پایین: نمای افقی.  
این ماشین سه سیلندر و دو انبساط دارد (نوع دوپویی دولوم).

با حفظ آب‌بندی خود تحمل کنند. وانگهی ماشینهای هاونی برای انبساط دوگانه بسیار مناسب بودند، تنها می‌بایست دو سیلندر با ابعاد مختلف را به‌طور عمودی روی آنها نصب کرد. آقای بزمان نورمن که یکی از پیشگامان ساخت ماشینهای چند انبساطی بود در سال ۱۸۶۵ از ماشین هاونی در کشتی استفاده کرد.

در بارهٔ رواج سریع این نوع ماشین که حدود سال ۱۸۸۰ در همه‌جا دیده می‌شد بیش از این چیزی نمی‌گوییم و سخن خود را تنها با ذکر این نکته به‌پایان می‌بریم که دیزلهای بزرگ کشتیهای



شکل ۱۸. ماشین با شاتون گردان، در حین کار سمت چپ: سیلندر؛ میانه: محور پروانه؛ راست: کندانسور.

امروزی که موتورهای بسیار قوی پیستونی دارند از نوع هاوونی می باشند. ماشین بخار با شاهنگ پایین مربوط به قایق تندرو اسفنگس نخستین ماشین بخار کشتی فرانسوی بود. این ماشین ۱۶۰ اسب قدرت داشت، درحالی که موتور دیزلی کشتی مسافری فرانس دقیقاً هزار برابر آن: ۱۶۰۰۰۰ اسب قدرت دارد.

### ارزیابی قدرت، نابهنجاریهای بازده، نظریه تجربی

کارایی نظری، محاسبه آن: حدود سال ۱۸۲۰ ارزیابیهای قدرت یک ماشین بخار هنوز سیمایی بسیار کهنه داشت. محاسبه آن تقریباً چنین انجام می گرفت.

یک کارایی نظری و یک کارایی مفید تشخیص می دادند. محاسبه کارایی نظری را از روی طرح تعیین می کردند یا بدین شکل انجام می گرفت که چگونه می تواند این کارایی در یک ماشین موجود حداکثر باشد. مسأله مربوط به محاسبه قدرتی بود که در مجلد پیشین توضیح داده شد و بر پایه ارزیابی فشاری که بخار بر پیستون وارد می کرد. مقدار فشار، سطح پیستون، طول رفت پیستون و مدتی که این حرکت طول می کشد فاکتورهایی بودند که می بایست در محاسبه شرکت داده شوند. برپایه کاری که بتانکور در سال ۱۷۹۰ منتشر ساخت دانسته شد که فشار معکوس کندانسور باید از این مجموع کسر شود.

محاسبه ماشینهای کم فشار یا ماشینهای پرفشار بدون دانستن دشوار نیست. مورد اخیر خیلی بیش از حد تصور وجود دارد. همچنین گویا قاعده‌ای برای لوکوموتیوهای اولیه وجود داشت. در این لوکوموتیوها فشار بخار در تمام مدت رفت پیستون ثابت می‌ماند و محاسبه قدرت به یک عمل ضرب خلاصه می‌شد.

اما ماشینهای دارای دانانت وضع بکلی دیگری دارند. شگفت‌آور است که روش نمودارسازی بسیار ساده‌ای که وات آن را پیشنهاد کرد (رجوع کنید به جلد سوم، صفحه ۱۳۰، شکل ۶۲) با موفقیتی روبه‌رو نشد. شاید علت شکست آن این بود که عوامل محدودی بوسیله آن نشان داده می‌شدند، مانند نشانگر وی که در جای خود، باز از آن سخن خواهیم گفت. به هر تقدیر می‌توان ادعا کرد که در فرانسه که از ماشین وولف استقبال شایانی شد، و حال آنکه روش کار در مراحل ابتدایی خود باقی مانده بود. آقایان آشت<sup>۱</sup> و پرونی از اینکه توانسته بودند متوسط فشار را در آغاز و پایان رفت پیستون داشته باشند خرسند بودند. آقای هرون اهل ویلفوس<sup>۲</sup> کمی دقیق‌تر کار کرد. او فشار بخار را در پنج نقطه با فاصله مساوی ارزیابی می‌کرد: شروع حرکت پیستون، پس از طی ربع مسیر، میانه مسیر، سه‌چهارم و بالاخره پایان حرکت پیستون (۱۸۱۹). در همه این موارد مقدار فشار را متناسب با عکس حجم فرض کرده است. ما بعدها این مسأله را رسیدگی خواهیم کرد.

آقای پرونی در سال ۱۸۲۶ فرمولی را پیشنهاد کرد که برپایه محاسبه تقریبی یک انتگرال معین بود و برای این کار روشی را به‌کار گرفت که مبتدل می‌نمود و که در سال ۱۷۹۰ بیان شده بود. آقای سعدی کارنو خود را وقف تحقیق فرمولی در این باره کرد اما یادداشت‌هایش مدتها بعد، و تنها در سال ۱۹۶۶ انتشار یافت. مناسبترین روش کار استفاده از لگاریتم به اصطلاح طبیعی، نپرین یا هذلولی بود. آقای پرونی در مجله *Annales des Mines* سال ۱۸۳۰ جدول بسیار کاملی در این باره به چاپ رسانید. آقای آرتور مورن نیز در سالهای ۱۸۳۸ و ۱۸۴۳ در نشریه *Aide-mémoire de mécanique pratique* خود به چنین کاری دست زد. مهندسان در اواخر سده نوزدهم چنین روشی را عموماً مورد استفاده قرار می‌دادند، اما معلوم نبود که این روش از کی عمومیت یافته است. بدین ترتیب، برای اینکه در عمل از آن استفاده شود تنها کافی بود که مقادیر لگاریتمهای مربوطه را برای اعداد صحیح از ۱ تا ۱۰ تا چهار رقم اعشاری دانست. معلوم است که در اینجا مطمئناً تهیه جداولی که مستلزم محاسبات سرگیجه‌آور باشد منظور ما نیست. دلیل ساده‌ای که جداول معمولی را نمی‌توان در این مورد به‌کار گرفت، رواج این روش را تا مدتها به تأخیر افکند.

۱. Hachette ژان نیکلایر ۱۷۶۹ - ۱۸۳۴ ریاضیدان فرانسوی

نشانگر وات و اندازه‌گیری قدرت اسمی: دیده می‌شود که در دوران که مورد بررسی ما است محاسبه فشار بخار بر پیستون باز هم ساده‌تر شده است. در آن دوران هنوز هیچ‌گونه وسایل سنجش مستقیم این فشار ساخته نشده بود. با این حال، از حدود سال ۱۷۹۶ وسیله مخصوص این سنجش وجود داشته است و این همان نشانگر وات است که در مجلد پیشین (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۱۳۱، شکل ۶۳) از آن سخن رفته است. رواج آن تنها پس از گذشت سالهای زیاد سرعت گرفت.

کاربرد این نشانگر در سوهو برای مدتهای مدید محدود باقی ماند. از آن تنها برای تنظیم ماشینها در کارخانه، پیش از تحویل آنها استفاده می‌شد. آقای دیکینسون حکایت می‌کند که چگونه آقای فیری در سال ۱۸۲۶ شاهد کاربرد آن در روسیه بوسیله عوامل اصلی مؤسسه وات-بولتون بوده است و چگونه وی این نشانگر را از آنجا به انگلستان بازگردانیده است. معذک آقایان هیلز<sup>۱</sup> و پیسی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۲ یک سند انگلیسی مربوط به تاریخ ۱۸۲۲ در این باره ارائه داده‌اند. بدون در نظر گرفتن جزئیات امر، در هر حال روشن است که این یک راز حرفه‌ای بود تنها پس از گذشت ۲۵ تا ۳۰ سال افشا شد.

در فرانسه طبیعی است که کمی تأخیر وجود داشته باشد. نوشته‌ای از سالهای ۱۸۲۷ - ۱۸۲۸ که آقای کریستین<sup>۳</sup>، مدیر کنسرواتوار پیشه و هنر به چاپ رسانیده است ظاهراً در این باره نخستین مدرک است. پس از وی آقای کلاپیرون در بازگشت از روسیه که مدت ده سال (۱۸۲۰ - ۱۸۳۰) در آنجا بود در سال ۱۸۳۴ مقاله مشهوری انتشار داد که طی آن از سیکل کارنو، نمایی به شکل نمودار نشانگر وات می‌ساخت. آقای شارل کومب در همین زمان، پس از یک سفر تحقیقی به انگلستان، این نشانگر را گزارش می‌کند. در آن زمان، نوع کامل شده‌ای به کار گرفته می‌شد که مکانات<sup>۴</sup> ساخته بود. وسیله اخیر می‌توانست وضع ماشین را در زیر فشار و سرعتهای بسیار بالا نشان دهد.

چنین می‌نماید که حدود سال ۱۸۴۰ بود که ساخت و کاربرد این وسیله به طور قطعی در فرانسه رواج گرفت. آرتور مورن، کارشناس پرآوازه اندازه‌گیری مقدار کار مکانیکی با وسایل ثباتدار، بنوبه خود اصلاحاتی در این نشانگر وارد ساخت. پس از وی آقایان گوستاو ریشاره<sup>۵</sup> و کراسبی<sup>۶</sup> مدل قطعی آن را، که مناسب فشار و سرعت زیاد بود تهیه کردند.

محاسبه نمودارها: بدین ترتیب توانستند مفهوم اسب اسمی (ارزیابی شده) را به دست آورند. هنوز از جهت محاسبه سطح نمودار، دشواریهای مهمی وجود داشت. نخست از روش سیمپسون<sup>۱</sup> برای این کار استفاده شد. در این روش از ده محور عرضی همفاصله که روی نمودار اندازه گرفته شده بودند یک محور عرضی میانگین را حساب می کردند. یک محاسبه تکمیلی فشار متوسط را می داد. این روش نتایج خوبی داشت، اما طاقت فرسا بود و در مواقعی که می بایست صدها نمودار محاسبه شوند - در آزمایشهای مهم چنین بود - اجرای بسیار دشواری داشت.

پیشنهاد شد که نمودارها را تکه تکه و آنها را وزن کنند همچنین از کاغذ شطرنجی استفاده شود. در اواخر سده نوزدهم این دو روش کمتر توصیه می شدند.

روشی که بسیار صحیح جواب می داد ارزیابی سطح نمودار بوسیله انتگرالگیر مکانیکی بود که سطح یاب امسلر<sup>۲</sup> نام داشت. در آن زمان این کار به دنبال کردن محیط نمودار با یک سوزن رسام محدود بود. آقای امسلر که در شافهاوزن<sup>۳</sup> استاد بود وسایل گوناگونی برای این کار در سال ۱۸۵۵ طرح کرد. کمی پس از آن خود وی اداره یک مؤسسه ابزار دقیق را به عهده گرفت.

آقای امه ویتز در سال ۱۹۱۳ نوشته است: «رسم یک نمودار خوب بیشتر هنر می خواهد تا دانش؛ برای این کار دقت، آزمودگی و آموزش لازم است زیرا در یکبار هیچ کس موفق نخواهد شد.» کارایی: تا کنون ما از بازده نظری - آن طور که در گذشته اصطلاح شده بود - سخن گفته ایم؛ ما چگونگی آن را شرح دادیم و دیدیم که چرا این ارزیابی تنها در محاسبات مؤسسه سازنده باقی ماند و در آزمایش ماشینهای موجود به جای آن از قدرت ارزیابی شده گفت و گو می شد.

ما، همچنین دیدیم که حدود سال ۱۸۲۰ بود که به مفهوم کارایی پی بردند. در اینجا تنها باید بگوییم که در آن دوره چه تعریفی از آن داشتند و چگونه بر پایه آن به مفهوم کنونی قدرت مفید رسیدند.

در اصل، هر ماشین که جهت انجام دادن وظیفه خاصی ساخته شده باشد در آن تنها به مقایسه مقدار زغال سوخته شده در دیگ بخار و مقدار وظیفه انجام شده بوسیله ماشین «گیرنده» یعنی در حال کار اکتفا می کنند. روش اندازه گیری مقدار آب مصرفی که بسیار آسان و بدقت انجام پذیر بود بزودی به عنوان ملاک به کار گرفته شد. بدین ترتیب بود که در انگلستان در روزگار اسمیتون مفهوم duty مطرح شد، اصطلاحی که فرانسویان آن زمان آن را *effet* ترجمه کردند. علت این بود که

1. Simpson

۲. Amsler یا کوب ۱۸۲۳ - ۱۹۱۲ ریاضیدان سوئیسی در شمال آن کشور، در ساحل شمالی راین

۳. Schaffhausen یکی از کانونهای سوئیسی



در آن زمان، چه عامل زمانی را در حساب می‌آوردند یا نه، همین اصطلاح را به‌کار می‌گرفتند، به‌طوری‌که بنابر متون موجود، اصطلاح *effet* هم به معنای کار بود و هم قدرت. با این حال، در ربع نخست سده نوزدهم، اصطلاح *effet* رفته‌رفته منحصرأً معنی قدرت را می‌داد، زیرا در عمل اغلب اوقات به قدرت توجه داشت تا کار.

این نظر درستی بود، بخصوص اینکه در اندازه‌گیری مقدار آبی که بوسیله تلمبه‌ای که با ماشین بخار کار می‌کرد. بالا می‌آمد در واقع کار این ماشین اندازه‌گیری نمی‌شد و با این کار مرتکب اشتباه می‌شدند زیرا مقداری از قدرت، جذب انواع اصطکاکها می‌شد؛ آنها بدین امر واقف بودند اما نمی‌توانستند مقدارش را اندازه بگیرند.

این مسأله چنان حقیقت داشت که نویسندگان آن دوران در زیر عنوان *effet utile* دو موضوع کاملاً مختلف را تعریف می‌کردند.

ضریب محاسبه *effet utile*: یکی از آنها محاسبه شده بود، و آن قدرتی بود که به حق از ماشینی که بازده نظری آن را می‌دانستند انتظار داشتند. این موضوع را به‌طور کلی ضریب  $\frac{2}{3}$  می‌نامیدند. این تقسیم بر ۳ در آن زمان از کار روزمره آقای بلیدور (آغاز سده هجدهم) به‌دست آمده بود و احتمالاً در دورانی بسیار پیش از وی نیز به‌کار گرفته می‌شد. آقایان پونسله و پرونی نیز در سالهای ۱۸۲۰ - ۱۸۲۵ آن را مجاز می‌شمردند. تنها تغییری که در این ضریب پدید آمد تطبیق دادن آن در پیروی از قدرتهای مختلف بود. حدود سال ۱۹۰۰ مهندسان برای ماشینهای کوچک از ۵ تا ۱۰ اسب، ضریب ۰/۶ را پذیرفتند و برای ۱۰۰ اسب ضریب ۰/۸ و بالاخره در ماشینهای ۳۰۰ اسب ضریب ۰/۸۵ را به‌کار گرفتند. آقای امه ویتز در سال ۱۹۱۳ چنین اظهار عقیده می‌کند: «ما اعتراف می‌کنیم که همه این ارقام، از مقوله تجربه ناب هستند، اما به کمک آنها به نتایج قابل قبول رسیده‌ایم؛ بنابراین روشی درست است.»

*effet utile* که با مهار اندازه‌گیری شده یا قدرت مؤثر: باید گفت که تحت عنوان *effet utile* واقعاً توانستند کار انجام گرفته را اندازه بگیرند. روشن است که یک اندازه‌گیری درست، می‌بایست روی محور خود ماشین، درحالی‌که کار معمولی خود را انجام می‌دهد به‌عمل آید. این کار تا سال ۱۸۲۱ انجام نگرفت. در این سال بود که آقای پرونی کاربرد لگام دینامومتری را شناسانید و نام وی بر این لگام مانده است. آقای پرونی، مدیر پرآوازه مدرسه پل و راههای شوسه در آن زمان در یک دادگاه به‌عنوان کارشناس برگزیده شده بود و می‌بایست یک ماشین قدیمی و یکطرفه وات را که در سال ۱۷۸۸ برادران پریه آن را تهیه کرده بودند با یک ماشین جدید وولف که آقای ادواردز

بتازگی تحویل داده بود مقایسه کند. دربارهٔ لگام پرونی، جز اینکه بگوییم که سرعت رواج یافت و اصول آن دستخوش هیچ تغییری نشد سخن دیگری نداریم. با این همه می‌بایست آن را، برای اینکه بتواند در سرعتها و قدرتهای زیاد استحکام داشته باشد، اصلاح می‌کردند. آقای پرونی از وسیله‌ای با طوقه‌های انعطاف‌ناپذیر استفاده می‌کرد و در ۱۸۲۱ توانست ۱۲ تا ۱۵ اسب با ۱۶ دور دقیقه را اندازه بگیرد. بعدها لگامهای انعطاف‌پذیری ساختند که از یک تسمه آهنی یا فولادی نرم و مجهز به سطوح اصطکاک چوبی که داخل یک نیم‌دایرهٔ جالب مربوط به دورهٔ طبل، یا یک فلکه متصل به محور آن بود تشکیل می‌شد. لازم بود که از جریان پیوسته‌ای از آب صابون استفاده شود. برای قدرتهای زیاد، فلکه‌هایی به‌کار می‌بردند که جریانی از آب سرد از داخل آن را خنک می‌ساخت؛ در این صورت، لگام شکل تازه‌ای - لگام طنابی - به خود می‌گرفت. یک سر این لگام در جایی ثابت نگاه داشته می‌شد و سر دیگر آن را وزنه‌ای کشیده می‌داشت. این دستگاه با گرافیت مداد رونوازی می‌شد. بدین ترتیب، آزمایشهای چندین ده ساعتی با این لگام انجام‌پذیر می‌شد.

دقیق‌تر شدن تدریجی مفهوم بازده: زمانی که مقدار زغال مصرفی در مدت زمان معلوم برای تولید قدرت معینی را در نظر می‌گیرند، ارزیابی بسیار غیردقیقی انجام داده‌اند. در واقع، ماشین بخار، بخار را مصرف می‌کند نه زغال را. این دیگ بخار است که زغال مصرف می‌کند و دیگ بخار نیز قدرت و بازدهٔ خاص خود را دارد.

همان‌گونه که دیده شد مهندسان اواخر سدهٔ هجدهم بنوعی تخمین کلی، خشنود بودند. بعدها، در ربع نخست سدهٔ نوزدهم رفته‌رفته به بررسی دقیق دیگ بخار پرداختند و آزمایشهای چندی در این باره انجام گرفت. نه تنها انتقاد از سیستمهای موجود رواج یافت بلکه بدیهی است که به تعیین استانداردهای عملی برای سازندگان آتی نیز دست زدند. رفته‌رفته به وجود و بازده مشخص: دیگ و ماشین، پی بردند.

آیین‌نامهٔ مسابقه‌ای مربوط به سال ۱۸۴۸ نشان می‌دهد که در این اوان این دو نوع بازده بخوبی روشن بودند: مسابقه برای ساخت ماشینی بود که با هر کیلوگرم آب «بخار شده یا وارد به دیگ» مقدار ۴۰۰۰۰ کیلوگرم متر اسمی یا ۳۰۰۰۰ کیلوگرم متر واقعی کار تولید کند. مقدار کار مورد نظر نه به مقدار زغال مصرفی بلکه به مقدار بخار بستگی داشت.

از نظر تعبیر دقیق کلام عبارت «یا وارد به دیگ» قابل تأمل است. مفهومی که در پشت آن نهفته، نشان‌دهندهٔ تردیدهای بسیاری است که در این زمان درباره کار واقعی ماشینهای بخار وجود داشته است و فرضیهٔ نادرستی که برای پاسخ دادن به مسائل حل نشده سرهم‌بندی کرده بودند.

اما پاسخ درست این مسأله چگونه قدم به قدم به دست آمد، این بحثی است که هم اکنون در زیر بدان خواهیم پرداخت.

کمیت گمشده: از مدتها پیش، گرچه نمی توان بدقت گفت از کی؟ - گفته شده بود که ماشینهای بخار، بیش از اندازه، آب مصرف می کنند. بررسیها هر قدر دقیقتر شد، کمیت این آب گمشده، شگفتی آورتر گردید.

در نیمه نخست سده نوزدهم توزین بخار مربوط به حجم یک سیلندر، بسیار تقریبی بود و از آب وارد شده به دیگ همیشه کمتر نشان داده می شد. این پدیده در لوکوموتیوها بیشتر شگفت انگیز بود. در سال ۱۸۳۵ نویسنده ای بسیار بد اخلاق اما بسیار فعال با نام کویونو دو پامبور<sup>۱</sup> درباره لوکوموتیو رساله ای نگاشت، وی مسأله بسیار ساده ای را توضیح داد که بعدها توجه بسیاری را به خود جلب کرد: اضافی آب وارد شده به دیگ به نظر وی به شکل مه با بخار خارج می شود. این پدیده همراهی مه با بخار، توهم نیست اما مقدار آن هم هرگز از ۵٪ کل آب فراتر نمی رود - چیزی که بعدها تأیید شد. اما در سال ۱۸۳۵ مسأله اتلاف آب از ۱۵ تا ۴۰٪ مطرح بود و مقدار آن بستگی بطرز کار دیگ داشت. این توجیه همراهی آب با بخار را در سال ۱۸۳۰ آقای هیکرافت<sup>۲</sup> پیشنهاد کرد. وی وزن بخار آب را که از روی نمودار تعیین کرده بود با وزن آب میعانی مقایسه کرد و تفاوت ۳۰٪ را به دست آورد. شکی نیست که آقای پامبور که آزمایشهای خود را روی لوکوموتیوها در انگلستان انجام می داد این اندیشه را از هیکرافت گرفته بود. بعدها در سالهای ۱۸۴۳ - ۱۸۴۴ آقای فریمو<sup>۳</sup> نیز در فرانسه به بررسیهایی درباره مقدار گرمایی که به کندانسور می رود پرداخت و مقادیر آن را با مقادیری که مطابق نمودار باید شامل بخار آزاد شده باشد مقایسه کرد. وی تفاوت را ۴۰ و حتی ۵۰٪ یافت، اما نتوانست علت را بیان کند. طبیعی است که بازده ماشین بر افزایش درصد آب همراه با بخار با تناسب مستقیمی کاهش می باید زیرا باید برای گرم کردن این مقدار آب، که هیچ گونه نقشی در موتور ندارد مقداری زغال صرف کرد. در سالهای ۱۸۵۰ - ۱۸۶۰ این بحث هنوز به جایی نرسیده بود. در پرتو کارهای نشانگر وات و جدولهای آقای رنیو<sup>۴</sup> که در سال ۱۸۴۷ انتشار داد از آن پس وزن بخار که در سیلندر - طی یک ضربه موتور - مؤثر بود با دقت محاسبه می شد. اما این بررسیهای جدید - گرچه دقیقتر از بررسیهای پیشینان بودند، تنها جهت کلی بررسیهای اخیر را تأیید می کردند.

1. Guyonneau de Pambour 2. Haycraft 3. Frimot

۴. Regnault هانری ویکتور ۱۸۱۰-۱۸۷۸، شیمیدان و فیزیسین فرانسوی

قانون دتانت (کاهش فشار): مسأله دیگری که تا مدت‌ها حل نشده مانده بود، اما از آن کمتر سخن می‌رفت - زیرا برخلاف «آب همراه» مستقیماً به این اتلاف قابل توجه آب مربوط نبود، این بود که دتانت بخار پشت پیستون طبق چه قانونی عمل می‌کند؟

در اواخر سده هجدهم و اوایل نوزدهم، تردید نداشتند که این مورد با قانون ماریوت سازگار نیست. این عقیده کسان برجسته‌ای همچون آقایان پرونی و سعدی کارنو و شمار زیاد دیگری بود. آنان با در نظر گرفتن خنک شدن، فکر می‌کردند که فشار در مدت دتانت می‌بایست کمتر از فشاری باشد که با محاسبه به دست آمده است. اما این بررسی‌های کار ماشین نبود که بتواند دقایق پاسخ را به ما بدهد. وانگهی وات در نموداری که در گذشته مورد بحث قرار گرفت در ضمن می‌پذیرد که دتانت طبق قانون ماریوت انجام می‌گیرد.

دیدیم که پونسله در سال ۱۸۲۵ در مدرسه توپخانه و مهندسی شهر مس یک دوره درس مکانیک عملی ماشینها را اضافه کرد. وی در این کار، روشی کاملاً مستبدانه داشت، و به پستوانه شخصیت برجسته خود در هندسه، نظر خود را در همه جا تحمیل کرد. معلوم است که در مورد گازها قانون ماریوت تنها در صورتی دقیقاً مصداق دارد که گاز در مدت تغییر حجم خود دستخوش هیچ تغییر دما نشود. آقای پونسله فکر کرد که بخار آب نیز باید همین وضع را داشته باشد. بخار آب که در دیگ در دمای مربوط به فشارش حالت اشباع می‌یابد، به نظر وی تنها لازم است که از هرگونه خنک شدن آن طی مرحله دتانت، جلوگیری شود و تنها در چنین صورتی قانون ماریوت در مورد آن مصداق خواهد داشت. چنین می‌نماید که در آن زمان هیچ‌کس نمی‌دانست که بخاری که چنین دتانتی داشته باشد در پایان مسیر، حالت بخار داغ را دارد و چیزی که افکار پژوهشگران آن زمان را به خود مشغول کرده بود این بود که اقدامات لازم برای جلوگیری از سرد شدن به عمل آید. آقای ژاک آرمنگو حتی در سال ۱۸۶۱ نوشته بود: «لازم است که وسایلی که دتانت در آنها انجام می‌گیرد بخوبی کنترل شوند تا از خنک شدنهای از خارج جلوگیری شود وگرنه بخار دتانت شده مایع می‌شود و کاربرد قانون ماریوت درست نخواهد بود.»

این نظریه که از مغز هندسه‌دان پونسله تراوش کرده بود چنانچه یک تأیید عملی پشت آن نبود احتمالاً بزودی مورد اعتراض قرار می‌گرفت. در واقع می‌توان گفت که طی ربع نخست این سده دانشمندان برای اینکه بفهمند در سیلندر چه می‌گذرد هیچ وسیله‌ای نداشتند.

اما از زمانی که ابزار شایسته نشانگر، در اختیار آنها قرار گرفت همه چیز تغییر یافت. آنان تقریباً به طور منظم خطوطی به دست می‌آوردند که با قانون ماریوت سازگار بود. آقایان گوئن<sup>۱</sup> و لوشاتلیه

پس از عملی کردن آزمایشهای دقیق روی لوکوموتیوی که در ساحل راست خط پاریس - ورسای رفت و آمد می کرد، چنین نوشتند: «طی مدت دتانت، فشارهای بخار با دقت کافی از قانون ماریوت پیروی می کنند.» این آزمایشها به مباحثات پایان داد. بهتر دانستند که این واقعیت را ندیده بگیرند که این سازگاری با یک قانون فیزیکی کاملاً جا افتاده و بخصوص دارای شکلی ساده، در این مورد خاص، نوعی ناپهنجاری است.

ترمودینامیک و ماشین بخار: در سالهای پس از میانه این سده، ترمودینامیک دانش کاملی شده بود. دو یادداشت مهم آقای ژول تاریخهای ۱۸۴۵ و ۱۸۴۹ برخورد دارند. آنها در سال ۱۸۶۲ در *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers* به زبان فرانسه ترجمه و منتشر شدند. در سال ۱۸۶۴ بود که کلاوزیوس خاطرات خود را که متوالیاً از سال ۱۸۵۰ به بعد انتشار داده بود در یک مجلد گرد آورد. این مجموعه در ۱۸۶۸ به فرانسه ترجمه شد. در مورد رساله آقای رنکین، که نخستین اثر کامل درباره ماشینهای بخار است و زمانی تهیه شده بود که ترمودینامیک شکل گرفته بود، گرچه در سال ۱۸۵۹ به انگلیسی انتشار یافت تا ۱۸۷۸ به زبان فرانسه ترجمه نشده بود.

با این حال، این دانش تازه هیچگونه مساعدتی به مهندسان آن روزگار نکرد. سالهای بعد، زمانی که بررسی دستگاههای یخساز، موتورهای درونسوز و توربینهای بخار مطرح شدند، کارایی این رشته از دانش آشکار شد. موفقیتهای جالب این رشته علمی، همان طور که خواهیم دید، در زمینه ای کاملاً غیرمنتظره - شیمی - بود.

اما آنهایی که مأمور بررسی ماشینهای بخار پیستوندار بودند از رشته ترمودینامیک سود چندانی عایدشان نشد. آقای موریس دمولن<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۵ در این باره چنین نوشته است: «در این مورد ما تنها چند سطر به دست خواهیم آورد، زیرا چنین می نماید که ترمودینامیک محض، جز مورد افزایش فشار برای ماشین بخار، پیشرفت تازه ای نمی بیند. این دانش به شکل زمخت و ساده ای کار خود را به محاسبه بازده نظری یک ماشین بخار ایده آل، که گویا اتلاف خارجی و داخلی ندارد محدود کرده است و به طریق اولی کاربرد گرما در یک ماشین واقعی بنحوی است که یک مهندس می تواند با مصالح موجود آن را بسازد.»

نویسنده بالا سپس چند رقم جالب به دست می دهد. از سال ۱۸۸۰ تا ۱۸۹۵ فشار بخار کاری موتور از ۵ به ۱۰ کیلوگرم، و بازده نظری آنها از ۲۲۷٪ به ۲۷۳٪ رسید.

بنابراین، گرچه رشته ترمودینامیک به مهندسان آموخت که محدوده ای وجود دارد که هرگز

نمی‌توانند از آن بگذرند اما دربارهٔ وسایلی که نزدیک شدن به این محدوده را ممکن می‌سازند هیچ کمکی عرضه نکرد. نظریه‌ای که آقای هیرن<sup>۱</sup> بدان نامی عمومی داده بود در آن زمان در اوج شکوفایی قرار داشت. این نظریه، ماشین بخار را مستقل از مصالح سازنده آن بررسی می‌کند. این نظریه ناگزیر بنوعی آرمانی شدن انجامید که احساس می‌شود در سال ۱۸۶۰ این بررسی در نارساییهای آن بیهوده مدفون شد.

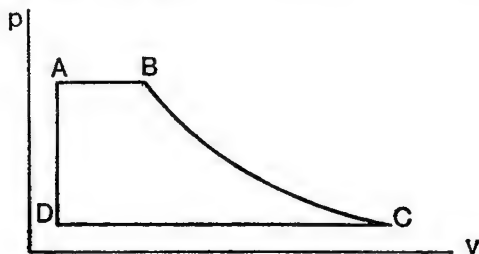
سیکل رنکین، نموداری ایدآلی: دقیقاً در چنین زمانی است که نمودار معروف به سیکل رنکین مطرح می‌شود. کلیات این سیکل با وجود خدماتی که آیندگان بدان کردند نمونه خوبی از همان گرایشی است که چند لحظه پیش آن را مورد انتقاد قرار دادیم.

بینیم سیکل رنکین چیست؟ به‌طور ساده می‌توان گفت که برداشتی از نشانگر است که همه «ناپهنجاریهایی» را که همواره در طرز کار یک ماشین واقعی وجود داشته است، ناپدید می‌کند. آقای رنکین می‌نویسد: «خمهایی که روی نشانگر به واقع تشریح شده‌اند، از نظر طرز تغییر فشار و حجم بخار، زمانی که روی پیستون عمل می‌کند با یکدیگر تفاوت دارند؛ چنان‌که توضیح آنها بوسیله یک سیستم کلی از فرمولهای ریاضی محال است ... برای اینکه محاسبه قدرت و بازده سیال در ماشینهای بخار، برپایهٔ اصول نظری ممکن باشد به‌جای یک نمودار واقعی از نوعی نمودار مجازی بسیار ساده و نزدیک بدان استفاده می‌کنند.»

این اظهار نظر چهار حکم را شامل می‌شود:

۱. فشار بخار، هنگام ورود به ماشین ثابت می‌ماند؛
۲. خم دثانت است. وی می‌گوید: «در نمودارهای واقعی، این خم به‌شکلهای گوناگونی ارائه می‌شود که بستگی به انتقال گرما به بخار، کش رفتن آن و علت‌های دیگر دارد. ویلیام رنکین می‌پذیرد که در ماشینی که عاری از پوشهٔ بخاری است یک دثانت بیدرو (آدیاباتیک) حکمفرماست؛ و در حالت معکوس «گمان می‌برند که گرمایی که بوسیله ... پوشهٔ بخار انتقال یافته و در سیلندر دستخوش دثانت می‌شود برای جلوگیری از هر میعانی دقیقاً کافی است.»
۳. در فشار ثابت فرار گرما وجود دارد.
۴. مرز نمودار با محور فشارها یکی می‌شود و این امر در واقع مربوط به یک ماشین مجازی است که رفت ندارد و بنابراین تراکم ایجاد نمی‌کند. (این مفاهیم رفت و تراکم در فصل بعدی تعریف می‌شوند.)

۱. Hirn گوستاو آدولف ۱۸۱۵-۱۸۹۰ دانشمند فرانسوی ترمودینامیک و فیزیک.



شکل ۱۹. نمودار سیکل رنکین.

در محور طولها: حجم؛ در محور عرضها: فشار.

(۱) AC طول حرکت دهنده: AB ورود بخار، BC دثانت؛ (۲) CD طول مقاوم، فرار

نویسنده سیکلی را برمی‌گزیند که نموداری محدود به سه خط مستقیم و خم دثانت (شکل ۱۹) آن را نشان می‌دهد. به‌طور کلی ما با شمایی سروکار داریم که گرچه قطعاً سازگار است در مقایسه با کار یک ماشین بخار پیستوندار، بسیار مجازی است. نمودار رنکین برای مهندسان توربین بیشتر سودمند می‌افتد.

در مورد خم دثانت، تنها بخش نمودار که رنکین توانست آن را مستقیم سازد، در آن زمان چه می‌توانستند بگویند؟ در این باره باید به بیان دقیقی پرداخت. به کمک مفاهیم تازه‌ای که از نظریه مکانیکی گرما استنتاج شده بودند: برابری کار و گرما، مفاهیم کار درونی، کار بیرونی و ... اندیشه درست‌تری از دثانت بخار یا به زبان دیگر، از سیال گازی نزدیک به میعان، پدید آمد. سه حالت را می‌شد از یکدیگر تمیز داد که دوتای نخست، نظریه محض بودند. آنها را رنکین در ماده دوم احکام خود که در بالا آورده شدند بیان کرده است؛ حالت سوم، تنها حالت واقعی است و همان حالتی است که همواره نشانگر ماشین پیستوندار ارائه داده است. اما خواهیم دید که این نوع دثانت، طبیعتاً یک ضریب آزادی دارد که نظریه پردازان نمی‌توانند آن را در محاسبات خود بگنجانند.

چنانچه فرض کنیم وزن معینی از بخار اشباع در محفظه‌ای داریم می‌توان تصور کرد که این بخار متحمل یک دثانت بیدرو شده است، یعنی هیچ نوع تبادل گرما ایجاد نمی‌کند. در این حالت، مقدار گرمای محتوی بخار، تنها برابر مقدار کار مکانیکی انجام شده، کم می‌شود. اما میعان جزئی هم وجود داشته است و بخشی از بخار مایع شده است تا مقدار گرمایی برابر با کار انجام شده بیرون دهد. حالت اشباع حفظ شده است. یک دثانت بیدرو از نظر مادی نمی‌تواند ایجاد شود.

حالت دوم می‌گوید: همان‌طور که آقای رنکین پیش از این گفته است. فرض می‌کنیم که در هنگام

دثانت، مقداری گرما درست کافی برای اینکه هیچ میعان ایجاد نشود و به بخار داده شود. چنین حالتی را دثانت با جرم ثابت اصطلاح کرده‌اند. وزن بخار موجود در سیلندر در جریان چنین کاری واقعاً بدون تغییر می‌ماند. اما چگونه می‌توان در یک سیلندر واقعی، مقدار کاملاً معینی گرما وارد کرد؟ بنابراین هر دو حالت پیش گفته، مجازی هستند و تنها برای سهولت استدلال طرح شده‌اند. سرانجام، به حالت سوم، که واقعی است می‌رسیم. بخار در جریان دثانت مقدار نامعینی گرما دریافت می‌کند که همواره بیش از مقدار گرمای کافی برای جلوگیری از میعان است. این مقدار گرما از چندین راه وارد آن می‌شود. به‌طور کلی از جدار سیلندر گرفته می‌شود، بعدها آن را شرح خواهیم داد. در چنین حالتی دثانت بیش از پیش به حالت گاز کامل نزدیک می‌شود، یعنی دثانت در دمای ثابت خواهد داشت («هذلولی»، اصطلاحی که در آن زمان معمول بود) و با قانون ماریوت سازگار است. بدین جهت، بر روی نشانگر شکلهایی پیدا می‌شود که تا مدتی این تصور را القا می‌کردند که برای بررسی مشکلات دثانت بخار آب، کافی است که قوانین گی‌لوساک و ماریوت را با یکدیگر ترکیب کرد.

در واقع شباهت قانون این حالت سوم دثانت با قانون ماریوت، صرفاً صوری است. برای اینکه گازی طبق قانون ماریوت دثانت یابد، چون دمای آن باید ثابت بماند، تنها کافی است که مقداری گرما برابر کار خارجی بدان داده شود. زمانی که بخار مطرح می‌شود دما پایین می‌آید و مقدار گرمایی که باید به سیلندر افزوده شود، همان‌طور که دیدیم، بیشتر از گرمای هم‌ارز با کار خارجی است. در پایان اضافه می‌کنیم که برای اینکه باز هم مسائل غامضتر شوند، خم نمودارها، چنانچه با شکلی که ما آن را شرح دادیم مزدوج شود به‌طور کلی بیش از مقدار معمول را نشان خواهد داد، این امر اشاره دارد به اینکه در سیلندر، به‌هنگام دثانت، فشار بیش از حد مورد انتظار است. کلید این رمز همان‌طور که خواهیم دید، این است که تجدید تبخیر می‌شود، اما در آن زمان این را در نظر نمی‌گرفتند.

کوتاه سخن اینکه ما دیدیم که در اواسط این سده و حتی کمی پس از آن‌هم، ماشین بخار قربانی یک بحران شد. ظریف شدن بررسیهای نظری که در این زمان رسم شده بود هیچ راه‌حلی به‌دست نداد. سرانجام راه‌حل پیدا شد اما برپایه بررسیهای تجربی بود. این ادعا آن‌قدر درست است که برای نامگذاری آیین تازه نام نظریه تجربی جعل شد. این نظریه اساساً کار هیرن بود و می‌توان تاریخ ۱۸۷۶ را به‌عنوان تاریخ قطعی بدان نسبت داد. تنها چیزی که مانده است چگونگی به‌دست آمدن آن راه‌حل است.



نظریه تجربی، پیشگامان: پدیده‌هایی که رفته‌رفته پایه نظریه تجربی ماشینهای بخار شدند از زمانهای بسیار دور شناخته شده بودند. اما در عوض می‌بایست سالهای زیادی را پشت‌سرگذاشت تا اینکه این نظریه‌ها اهمیت کافی یابند. در سال ۱۸۴۱ لئوناس توما که پرفسور اکول ساتترال بود و نیز کامی لورنس صنعتگر با یکدیگر مقاله‌ای جهت اثبات مفید بودن پوشه‌های بخارانتشار دادند. در آن زمان گرایش کلی به رها کردن آنها بود و تنها ماشینهای وولف و نیز ماشینهای کورنوال از آن استفاده می‌کردند. آقایان توما و لورنس که در سراسر زندگی همچون شریک با یکدیگر کار می‌کردند با تجربه خود نشان دادند که پوشه بخار سبب کاربرد بهتر گرما می‌شود. برحسب اتفاق آنها روند تغییرات فازهای فرعی را در سیلندری که به تناوب با دیگ بخار و محیط فرار آن (کندانسور یا هوا) - که دماهای بسیار نابرابری دارند - ارتباط دارد بادرستی و دقت تشریح کرده بودند. همان‌طور که آنان ادعا کردند، این روند قبل از همه با میعان بخار در لحظه ورود به ماشین، سپس تبخیر دوباره آن در لحظه فرار بخار مشخص می‌شود.

آقایان توما و لورنس به پشتوانه تعبیر خود از این روند اظهار می‌داشتند که این پدیده در ماشینهای بخار با سیلندر شیشه‌ای، که برای نمایش ساخته شده بودند و در آن زمان در بسیاری از آزمایشگاه‌های فیزیک وجود داشت، کاملاً قابل رؤیت است. آقای اوژن بوردون که به‌عنوان مخترع فشارسنج فلزی شهرت بسیار داشت، در سالهای ۱۸۳۳ - ۱۸۳۴ ساخت چنین ماشینهایی را شروع کرده بود. بعدها، در آغاز سده بیستم آقای آناطول ماله که شاگرد لئوناس توما در اکول ساتترال بود به یاد می‌آورد که در یکی از این نمایشهای ماشین بخار با سیلندر شیشه‌ای شرکت داشته است. دو سال پس از آن، در ۱۸۴۳ آقای شارل کومب بنوبه خود درباره مزایای پوشه بخار، دو نامه به آکادمی علوم پاریس تسلیم کرد. در این نامه‌ها تحلیلی از تأثیر جدار وجود داشت که مشابه نظرهای آقایان توما و لورنس بود. در این نامه‌ها ما با گزارش مشروحی از آزمایشهایی روبه‌رو می‌شویم که روی ماشین فارکو انجام گرفته بود. درحالی‌که گزارش دو نویسنده قبلی بسیار مبهم بود. آیا بدین علت بود که آقای کومب خود را ملزم به گزارش بررسیهایش ندیده است؟ قطعی است که وی با آنان در تماس بوده، زیرا از توما نام می‌برد.

این نخستین روایت، عمر چندانی نکرد. اکنون باید ببینیم که چگونه نظریه تجربی در دستهای آقای هیرن جان گرفت، کاری که بویژه مرهون بررسیهای جالبی است که نه آقای توما و لورنس و نه حتی کومب در آن نقشی نداشتند. برای اینکه زنجیره حوادث بهتر درک شود باید کلیاتی از کار هیرن ارائه داد.

کار هیرن: گوستاو آدولف هیرن در سال ۱۸۱۵ در لوگلباخ در حوالی کولمار زاده شد. تربیت اولیه وی کمتر کلاسیک، و گویا بخشی از آن بدون معلم بوده است. همان طوره غالباً در چنین مواردی اتفاق می افتد درباره هر چیزی که با آن برخورد می کرد با علاقه زیاد می اندیشید. وی کار خود را به عنوان شیمی دان در یک کارگاه قدیمی نساجی به نام هاوسمان - یوردان<sup>۱</sup> در لوگلباخ شروع کرد. این کارگاه در سال ۱۷۷۲ تأسیس شده بود. پدر وی قبلاً در این کارگاه به عنوان طراح ترکیب کننده کار کرده بود و با دختر مالک کارخانه ازدواج کرده و شریک کارخانه شده بود. در سال ۱۸۴۲ آقای گوستاو آدولف به بخش ماشین آلات کارگاه انتقال یافت. بعدها همراه با برادر خود، فردینان مالک این کارگاه شد. آقای فردینان مخترع انتقال نیروی محرکه از راه کابل دینامیک یا انتقال «تالودینامیک»<sup>۲</sup> بود، شیوه ای که اکنون تله دینامیک گفته می شود. هیرن نایبستی هیچگاه، حتی پس از جنگ ۱۸۷۰ میهن خود را ترک گفته باشد. فردینان گویا در سال ۱۸۷۹ فوت کرد و شرکت منحل شد و هیرن به کولمار بازگشت و در سال ۱۸۹۰ در آنجا بمرد.

ماشین بخاری که وی از سال ۱۸۴۲ مسئولیتش را داشت و با آزمایشهایی که روی آن به عمل آورد. شهرتی به هم رسانید از نوع ماشین وولف بود که کارخانه اشتهلین - هوبرت، یکی از ماشین سازان زبردست آلزاسی، ساکن بیسویلر در سال ۱۸۲۶ آن را تهیه کرده بود. در سالهای ۱۸۴۰-۱۸۴۵ این ماشین به عنوان یک ماشین ۳۶ اسب، با دیگی که فشار کاری آن سه اتمسفر بود فهرست شده بود. احتمالاً این قدرت به اسب اسمی محاسبه شده بود زیرا بعدها از آن با عنوان ماشین ۷۰ اسب صحبت می شد. می توان مطمئن بود که هر دو سیلندر آن را پوشه ای از بخار زنده در خود می گرفت. بدون تردید در سال ۱۸۲۶ اشتهلین از این اصل، که وولف با تمام نیرو از آن پشتیبانی می کرد و آقای ادواردز نیز در سال ۱۸۱۵ در شایو، ایمان خود را بدان ابراز داشته بود، تخطی نکرد. بعدها خواهیم دید که چگونه آقای هیرن در این ماشین بنابر مقتضیات آزمایشهای خود، تغییری بنیادی داد. در این کارگاه همچنین یک ماشین کم فشار که مؤسسه وات - بولتون در سال ۱۸۲۷ ساخته بود وجود داشت؛ و نیز یک ماشین کوچک کمکی، که اشتهلین - هوبرت تهیه کرده بود. اما ماشینهای اخیر گویا در آزمایشهای هیرن به کار گرفته نشدند.

انگیزه بررسیهای هیرن عمل صنعتی بود. این بررسیها تنها پس از کندوکاوهای خستگی ناپذیر فکری همراه با کار خستگی ناپذیر بار نشستند.

کارهای اولیه: بررسیهای اصطکاک: در سال ۱۸۵۴ آقای هیرن درباره اصطکاک و روغنکاری جزوه ای انتشار داد که پیوستی درباره «قانون تولید کالریک در اصطکاکها» با آن بود. نامه ای همراه

داشت که در آن پیشنهاد می‌کرد که آزمایشهایی در مورد پوشه‌های بخاری به عمل آید تا فواید آنها بازشناخته شود. ما در اینجا باشارل کومب روبه‌رو می‌شویم، زیرا از آقای هیرن، که استنتاجاتش درباره اصطکاک در ابتدا با مخالفت شدید برخورد کرده بود دفاع می‌کرد. هیرن به چشم یک دوست و استاد به کومب می‌نگریست و بعدها خاطرنشان ساخت که از آغاز تحقیقاتش، نوشته‌های سال ۱۸۴۳ را که در بالا مطرح شدند در دست داشته است. آقای هیرن از همان نخستین بررسیهای خود به نظریه مکانیکی گرما، که در آن زمان جدید و مورد بحث و مناظره بود، پیوست.

بررسیهای وی سبب شد که برای هم‌ارز مکانیکی، مقداری دقیق‌تر از آنچه مایر گفته بود پیشنهاد شود. پیشنهاد وی گرچه تاریخ ۱۸۴۲ را با خود داشت، تردیدی نیست که او تنها با یادداشت‌هایی که ژول طی آنها آزمایشهای معروف خود را شرح داده بود، آشنا بود.

سالهای ۱۸۵۵-۱۸۵۸ پوشه، بخار داغ: در سالهای ۱۸۵۵-۱۸۵۶ هیرن نظر خود را درباره مفید بودن پوشه بخاری انتشار داد. اما وی در همان سال ۱۸۵۵، که آزمایشهایش بتازگی پایان یافته بود، در ماشین لوگلباخ تغییری بنیادی ایجاد کرد و آن را به یک ماشین تک سیلندری بدون پوشه تغییر شکل داد، که ابعاد سیلندر آن  $600 \times 1710$  میلیمتر بودند و چهار کشو، بخار را توزیع می‌کردند؛ مانند ماشینهای کورلیس که بعدها ساخته شد. بالاخره و بخصوص وی یک داغ‌کننده بخار، که همان سال به ثبت رسانیده بود در آن کار گذاشت. این ماشین حدود سی سال با بخار داغ کار می‌کرد. این تغییرات قدرت ماشین را تا ۱۱۸ اسب واقعی بالا برد، آزمایشهای با لگام پرونی چندین بار این رقم را تأیید کردند.

هیرن به کمک این ماشین تازه توانست در سالهای ۱۸۵۷-۱۸۵۸ بررسیهای تازه‌ای درباره مسأله بخار داغ به عمل آورد.

لحظه‌ای روی نتیجه این کارها مکث می‌کنیم. نه پوشه‌های بخاری و نه داغ بودن بخار هنوز مکانیسمی را که بر پایه نظریه تجربی استوار باشد نداشتند؛ چیزی که باید به آن می‌رسیدند و هنوز بیست سالی از آن فاصله داشتند. آزمایشها گوناگون بودند. آقای هیرن همواره به کارهای خود با دید ترمودینامیک کاربردی می‌نگریست. در یک کلمه می‌توان گفت او افقهای دورتر از ماشین بخار را در نظر داشت، گرچه ماشین بخار، بخش صنعتی کار او بود که در پایان بیشترین اهمیت را داشت.

اما تا آن زمان هرگز در یک ماشین گرمایی نشان نداده بودند که بخشی از گرما هم‌ارز کار تولید شده ناپدید می‌شود. می‌دانستند که کارنو در کتاب خود *Reflexions* و پس از وی کلاپیرون توجه

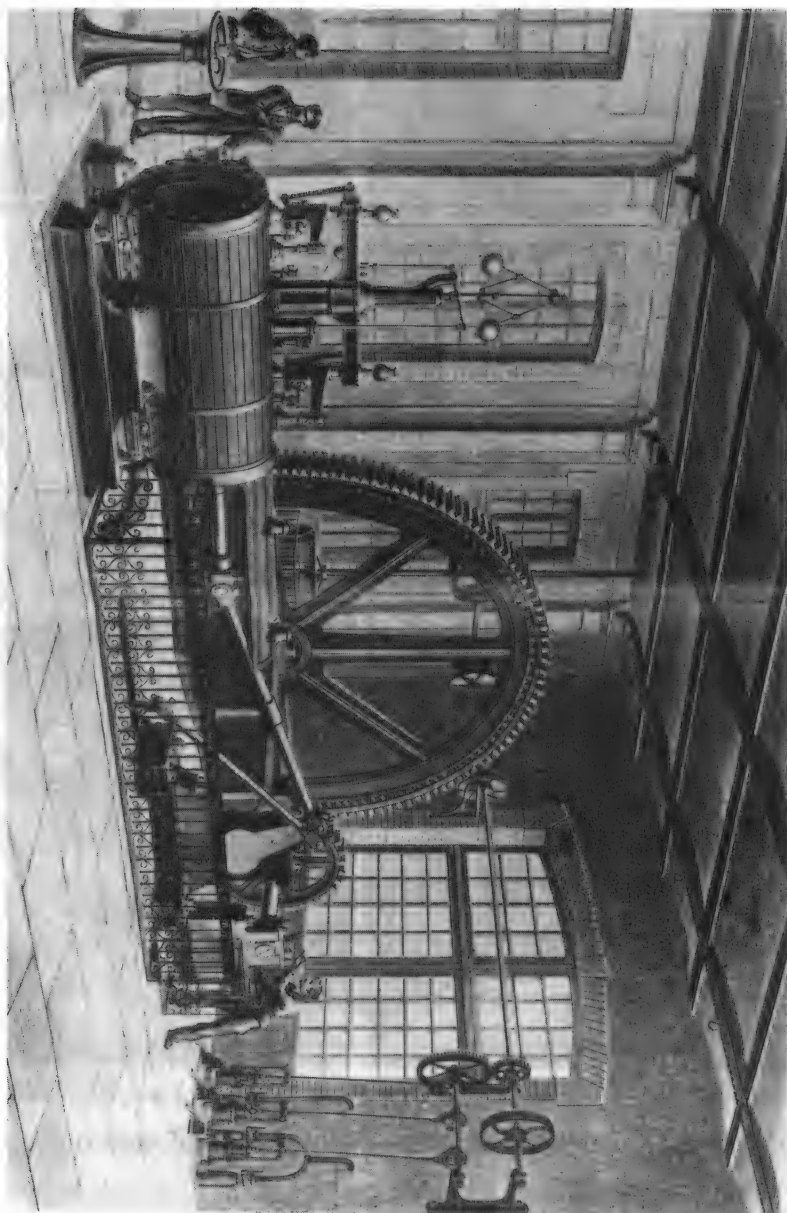
داده بودند که گرما کاری جز جریان از یک دما به دمای دیگر، بدون اینکه از مقدار آن کاسته شود، نمی‌کند.

با پذیرش نظریه مکانیکی گرما، کاری که هیرن انجام داد، نظریه بالا رد می‌شد. نتایج تجربی در آغاز فریبنده بودند؛ حتی گاهی تولید کار همراه با پیدایش گرما جلوه‌گر می‌شد! در واقع چون مقدار گرمایی که در یک ماشین صنعتی به کار تبدیل شده بود در برابر تعداد زیاد کاریهایی که در اجاق ایجاد کرده بودند بسیار کم بود هیچ توقعی از این کار نمی‌رفت. آقای هیرن، چنانچه کلاویوس از وی بشدت پشتیبانی نمی‌کرد به علت رقابت سختی که آکادمی برلن در سال ۱۸۵۷ ایجاد کرده بود قطعاً بررسیهای خود را رها می‌کرد. در حساب آخر، ناپدید شدن مقداری گرمای متناسب با کار تولید شده از حالت شک و گمان خارج شد. وانگهی هیرن توانست نخستین کار تجربی مربوط به میعان در جریان دتانت را نشان دهد، کاری که آقای کلاویوس و رنکین آن را پیش‌بینی کرده بودند و در گذشته از آن سخن رانندیم. درباره تأثیر جدار نیز نقش آن ندیده گرفته نشد، اما هنوز اهمیت لازم را به آن نمی‌دادند.

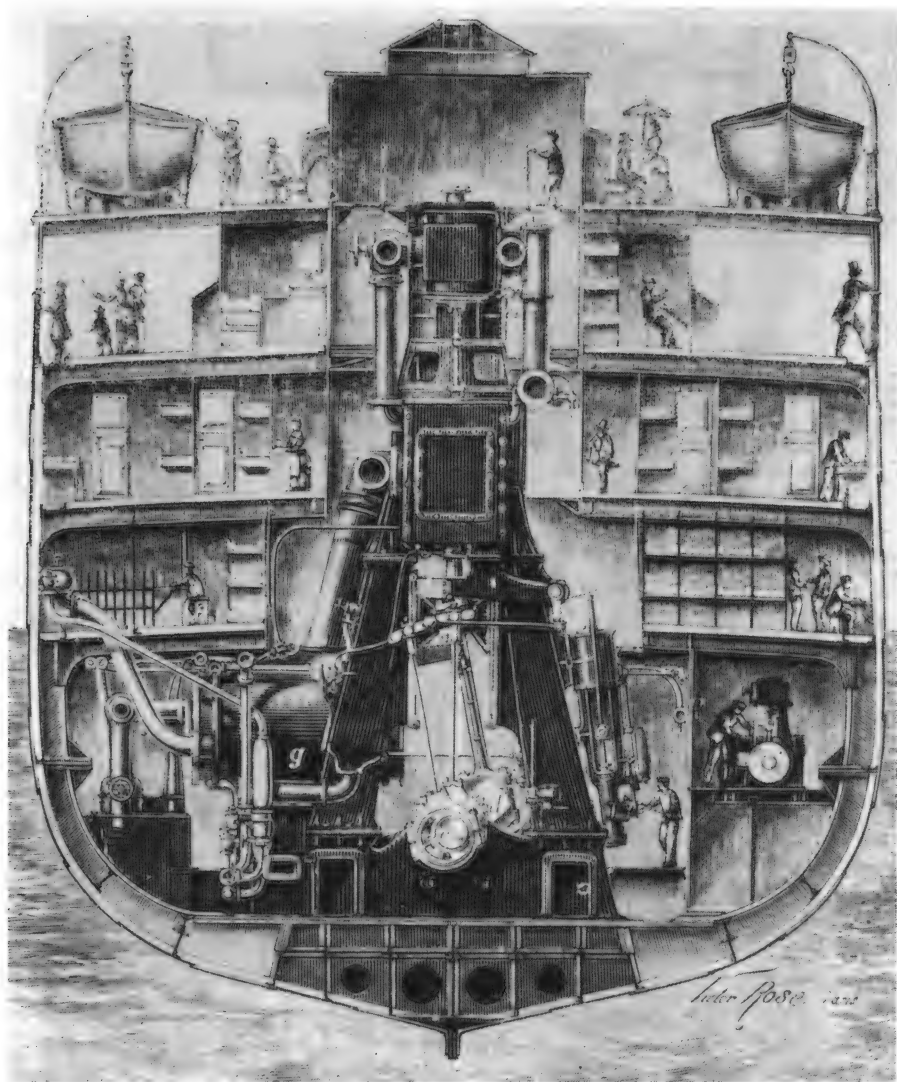
آقای هیرن در سال ۱۸۶۲ نخستین چاپ کتاب خود را درباره نظریه مکانیکی گرما بیرون داد. سه سال پس از آن، در سال ۱۸۶۵ چاپ دیگری از کتاب وی منتشر شد. با مقایسه این دو چاپ، احساس می‌شود که مسئله تأثیر جدار، روز به روز بیشتر فکر این مهندس آلمانی را به خود مشغول داشته بود.

سالهای ۱۸۶۷-۱۸۸۰ مسئله آب همراه: در سال ۱۸۶۷ هیرن با همکاری آقای لولوتر<sup>۱</sup> به رشته آزمایشهای تازه‌ای روی ماشین لوگلباخ دست زد. مسئله اصلی این بررسیها شناخت بهتر تأثیر داغ کردن بخار بود. لولوتر نخستین نامی بود که شهرت یافت، اما چند نفر دیگر هم با آقای هیرن همکاری داشتند. آقای هیرن در پرتو بدیع بودن روشش و بدون شک شخصیت جالبی که داشت توانست رفقای بسیار صمیمی در اطراف خود گرد آورد. این، توفیقی بسیار پرارزش بود زیرا درغیراین صورت نمی‌توانست بررسیهایی را که باید بدقت بسیار زیاد و هزاران بار و همراه با محاسبات جانفرسا انجام گیرند به پایان برساند. آقای هیرن همچنین ناگزیر شد برای رفع نیازهای کارش، نه تنها نشانگر وات بلکه سطح‌یاب امسلر و حتی آریتمومتر<sup>۲</sup> هموطن خود توماس کولمار را تکمیل کند.

در کارهای سال ۱۸۶۷ تأثیر جدار به شکل بسیار مشخصتری مورد بحث قرار گرفت. چندی بعد، هیرن آقای لولوتر را که در این راه گام برمی‌داشت مورد لطف قرار داد. تأثیر این همکار بر استاد ظاهراً در این زمان قطعی بود. وانگهی تا آن زمان به طور کلی رسم بد اندازه‌گیری مصرف ماشین



تابوری ۳. ماشین بخار ۱۰۰ اسبی، نوع کورلیس، حدود ۱۸۷۸.



تابلوی ۴. ماشین بخار هاوونی کشتی باری شامپانی، حدود ۱۸۸۵.

بخار براساس کیلوگرم زغال برای هر اسب در هر ساعت، هنوز معمول بود. هیرن در مخالفت با این رسم نشان داد که باید مصرف را در برابر کیلوگرم بخار تولید شده در نظر گرفت. روشن است که طی یکی دو روز مباحثه پایان نیافت و بدرستی نمی دانستند که این عادات در چه فاصله زمانی تغییر خواهند کرد: شاید در سایه پذیرش نظریه تجربی در آینده!

در آن زمان ماشینی را خوب می دانستند که برای هر اسب در یک ساعت دو کیلوگرم زغال مصرف کند درحالی که بازده دیگهای بخار این دوران، ۱۴ کیلوگرم بخار برای یک اسب در هر ساعت بود. ماشین لوگلباخ استثنائاً به عنوان ماشین خوب شناخته شد زیرا ۹ کیلوگرم بخار برای یک اسب در هر ساعت بازده داشت.

آیا باید اثر جدار را مسؤول اصلی اتلاف زیادی دانست که در کار ماشینهای بخار وجود داشت؟ در پاسخ به این پرسش پیش از اینکه در مطالعات کالری سنجی برای اثبات احتمالی آن غرق شویم باید مسأله آب همراه را که تا آن زمان گشوده نشده بود رفع و رجوع کرد. سالیان زیادی Société industrielle de Malhouse این موضوع را به رقابتی تقریباً همیشگی گذاشته بود و هیچگاه جایزه آن پرداخته نشد. آقای هیرن با این مسأله درگیر شد و در رساله ای که در ۱۸۶۹ انتشار داد سرانجام راهی برای اندازه گیری مقدار آب همراه پیشنهاد کرد. وی نشان داد که آب همراه وجود دارد، اما درباره مقدار آن غلو بسیار شده است. وانگهی آزمایشها نشان می دادند که مقدار این اتلاف را می توان قابل توجه دانست درحالی که طی اندازه گیریها مقدار آب همراه برابر هیچ به دست آمده بود. یک دماسنج مقایسه ای با هوا که با کمک هالوئر<sup>۱</sup>، یک همکار جوان دیگر هیرن ساخته شده بود در این بررسیها وسیله با ارزشی بود.

سالهای ۱۸۷۳-۱۸۷۷ مرحله قطعی: مرحله قطعی، یک دوره پنج ساله ۱۸۷۳-۱۸۷۷ را دربر می گیرد. در سالهای ۱۸۷۳ و ۱۸۷۵ آقایان هیرن و هالوئر و همکار دیگر آنها آقای پوپاردن<sup>۲</sup> دو رشته طولانی آزمایش انجام دادند و نتایج آنها در ۱۸۷۷ منتشر شدند. در این حین در سال ۱۸۷۶ آقای هیرن تحریر سومی از نظریه خود انتشار داد که در آن بر روی مسأله تأثیر جدار نموهای بسط یافته مکشی نکرده بود و این رفتار «با همه صراحت مطلوب» انجام گرفته بود. مؤلف می نویسد: «همه نظریه ما قبل تجربی را برای ماشین بخار باید ناممکن به شمار آورد». همچنین باید خاطرنشان ساخت که آقای هیرن در سال ۱۸۷۳ یک وسیله اندازه گیری فوق العاده جالبی ساخته بود تا در اندازه گیری کار مؤثر ماشین، به جای لگام پرونی آن را به کار برد. این وسیله که پان دینامومتر<sup>۳</sup> خمس نام داشت. تنها می توانست تغییر شکل قطعه ای را اندازه بگیرد که کار مورد نظر را منتقل

می‌کرد در حوزه کار شاهنگ ماشین لوگلباخ بود. با این وسیله آزمایشهای بسیار دقیقی انجام گرفت و بدون اینکه مزاحم کار روزمره کارخانه شوند آن را به‌کار می‌گرفتند.

نظریه تجربی در سال ۱۸۷۷ به‌طور قطعی پذیرفته شد. یک نفر بلژیکی به نام دولش‌اوورس دری<sup>۱</sup> در آن زمان به این به‌اصطلاح «هفت برادران مولوزی» پیوست. رشته مقالاتی که وی در سالهای ۱۸۷۸ - ۱۸۸۰ در Revue Universelle انتشار داد این نظریه جدید را به‌طور قطع افشا کرد. هالوئر نیز تا سال ۱۸۸۲ آزمایشهای خود را بر روی ماشینهای گوناگون ادامه داد. این آزمایشها همه نتایج پیشین را تأیید کردند. در سال ۱۸۷۹ شرکت صنعتی مولوز برای آقای هیرن جایزه‌ای مقرر داشت که به مدت ۱۰ سال سالانه ۱۰۰۰۰ فرانک از حساب امیل دولفوس<sup>۲</sup> به وی پرداخت شود.

پایان کار هیرن: نام تسئونر<sup>۳</sup> هنوز هم پرآوازه است. این مؤلف *traité des distributions Par tiroirs* شهرت خود را بویژه مرهون ابداع نقشه اجرایی در مختصات قطبی است که تهیه طرح مناسب برای کشور را ممکن می‌ساخت، هرچند احتمال می‌رود که این نوع نقشه اجرایی در انتشارات پیش از وی وجود داشته است. به‌هرتقدیر، آقای تسئونر با هیرن روابط دوستانه داشته است. آقای هیرن از اینکه آخرین استنباطات وی با سهولت و شدت از سوی تسئونر رد شده‌اند و اثر جدار را نوعی افسانه دانسته است بسیار غافلگیر شد. وی به‌جای آن، سیستم پیچیده و مطمئناً بر خطایی را با دخالت دادن حضور مستمر مقداری آب مایع شده در سیلندر پیشنهاد می‌کرد. این مورد، هم مانند آب همراه وجود دارد اما تأثیر آن بسیار کمتر از آن است که تصور می‌کنند. می‌توان پرسید که آیا ناراحتی تسئونر از اینکه نخستین کسی که این راه‌حل ساده و منطقی را پس از تفکر لازم یافته است نه خود وی بلکه استاد آلزاسی او بود انگیزه چنین اظهاراتی نیست؟ در سالهای ۱۸۸۱ و ۱۸۸۲ بین آنان بحث بسیار شدیدی درگرفت اما هر دو در مواضع خود پافشاری کردند. در واقع از ۱۸۸۰ - ۱۸۹۵، بنابر آنچه که از خواندن نوشته موريس دمولن برمی‌آید، نظریه تجربی بیش از پیش بررسی و سرانجام به‌طور کامل پذیرفته شد زیرا درک رضایتبخشی به مهندسان می‌داد. در پایان به توضیح کاملی دست یافتند بویژه اینکه این نظریه پیش‌بینی اصلاحاتی را که مدتها پیش از روی غریزه انجام گرفته شده بودند - اما ترمودینامیک به‌طور بسیار نارسایی درباره آنها می‌اندیشید -، ممکن ساخت: انبساط چندگانه، پوشه بخاری، داغ کردن بخار.

انتقادهای تسئونر آقای هیرن را بسیار تحت تأثیر قرار داد، وی در سال ۱۸۸۰ بازنشسته شد. مرگ دهشتناک هالوئر که در برابر انتقادها پشتیبان وی بود اندوه عمیقی در او پدید آورد. این استاد



سالخورده از اینکه در سال ۱۸۸۸ یک نفر انگلیس به نام براین - دانکین<sup>۱</sup> وسیله‌ای را به وی نشان داد که خود آن را آشکارکننده نامیده بود و جریانهای متناوب میعان و تبخیر را که نتیجه اثر جدار بود بخوبی نشان می‌داد بسیار خرسند شد. ما در گذشته از ماشینهای شیشه‌ای اوزن بردون صحبت کرده‌ایم. این بار کار روی ماشینهای واقعی بود زیرا ابزار آشکارکننده به همان شکل نشانگر وات روی سیلندر دستگاه سوار می‌شد. این ابزار از دو لوله شیشه‌ای هم‌مرکز به‌طوری ساخته شده بود که مانع هرگونه تبادل گرمایی با هوای محیط می‌شد. پدیده‌ها با وضوح مطلوبی از جدار لوله داخلی دیده می‌شدند.

در سال ۱۸۹۰، سال مرگ آقای هیرن، براین دانکن طوری ابزار آشکارکننده خود را تغییر داد تا بتوان از آن به‌عنوان گرماسنج استفاده برد، همه این تغییرات، نظریه موجود را تأیید می‌کردند. باید چند کلمه‌ای هم درباره شخصیت شگفت‌انگیز آقای هیرن سخن گفت، گرچه در خلال صفحات قبل قدری از شخصیت وی آشکار شده است. هرچند که آقای هیرن بسیار اجتماعی و خوش‌برخورد بود و گویا همیشه احترام عمومی و قطعی اکثر اطرافیان را نسبت به خود برمی‌انگیخت، با وجود طبیعت جدی کارهایش باید گفت وی روحیه مذهبی کمی کودکانه داشته است. او نظریه تجربی را تقریباً بناچار - نه از روی میل و رغبت - پایه گذارد و این بیشتر بقصد اثبات اندیشه‌های خرافی به کمک فیزیک گرما بوده است و خوشبختانه در این باره هیچ‌چیزی محو نشد و وی آن را در تعدادی از انتشارات خود ارائه داده است در این مورد با نوعی اتحاد عجیب وازه‌ها نوعی. «متافیزیک تجربی» را تبلیغ کرده است. همین‌طور می‌توان گفت که وی بموقع مرد زیرا چنانچه بیشتر می‌زیست همان خطایی را مرتکب می‌شد که برتو نسبت به اتم مرتکب شده بود - گرچه به‌علتی کاملاً متضاد با آن. در واقع، وی در اواخر زندگی خود نظریه جنبشی گازها را همچون نظریه‌ای شیطانی رد کرده بود چون در آن مولکولها با یکدیگر تماس مادی داشتند. چنین می‌نماید که تنها نوعی تأثیر از دور همراه با یک مشرب فلسفی روح‌گرایانه را در این باره می‌پذیرفت! هیرن خوشبختانه در ریاضی بیش از متافیزیک دست داشت و مکانیک اجرام سماوی مشغله ساعت‌های بیکاری وی بود. او بدون اینکه از کارهای ماکسول آگاه باشد با تأخیر بسیار، این فرضیه را که حلقه‌های کیوان (زحل) نمی‌توانند جامد یا مایع و نه گاز باشند و از ترکیب ذرات ریز جامد و منزوی از یکدیگر تشکیل شده‌اند، از نو کشف کرد.

چرخه‌ای که تحت تأثیر جدار است: اما ببینیم چرخه‌ای که تحت تأثیر جدار قرار دارد، آن‌طورکه مجموعه مهندسان در حدود سال ۱۸۹۵ آن را پذیرفته بودند، چگونه است. طرح کلی پدیده‌ها،

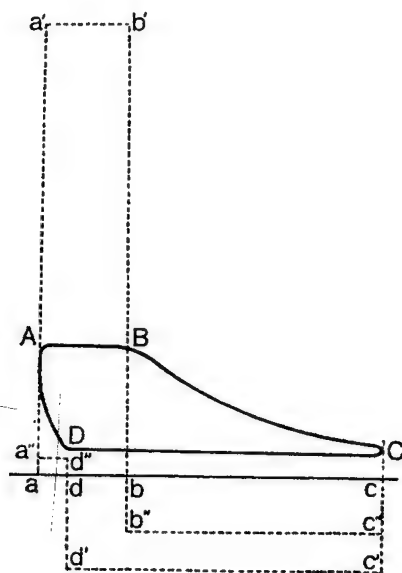
بدانگونه که در سالهای ۱۸۴۱ - ۱۸۴۳ پیشنهاد شده بود باقی ماند. با این تفاوت که گفته شد اندازه گرمای مؤثر، مقدار مهمی است و تبدلهای گرمایی با سرعت بسیار زیاد انجام می گیرند. گرچه اثر جدار متناظر با افزایش سرعت کاسته می شود به طوری که به حساب آوردن آن آسان است، ماشینهای پیستوندار بخار هرگز دارای سرعتی نخواهند بود که بتوانند اثر جدار را مجزا سازند.

اما به فازهای این چرخه بازگردیم، در فاز ورود، بخاری که از دیگ می آید با جدار ماشین، که دمای محیط فرار بخار، یا به عبارت دقیقتر، همان طور که تجربه نشان می دهد، در اثر تراکم، دمایی کمی گرمتر از آن را دارد، برخورد می کند. در اینجا پدیده نخست میعان اولیه اتفاق می افتد. طی تمام مدت ورود بخار، جدار ماشین بوسیله بخار گرم می شود.

زمانی که دتانت شروع می شود، فشار پایین می آید و آبی که قبلاً تشکیل شده است به حساب گرمایی که جدار ماشین در هنگام ورود بخار گرفته است بشدت غلیان می کند. در این مرحله، پدیده می تواند سه رفتار متفاوت داشته باشد: ۱) همه آب، طی رفت پیستون بتدریج بخار می شوند و در اواخر رفت پیستون، جدار ماشین خشک شده است - و این بهترین حالت ممکن است! ۲) مقدار آب بیش از آن است که همه آن تبخیر شود، در نتیجه در پایان رفت پیستون هم مقداری از آن روی جدار باقی خواهد ماند؛ ۳) مقدار آب کم است، بنابراین سریعاً تبخیر می شود. از سوی دیگر، پیستون که به پیش می رود به سطوحی بتدریج سردتر برخورد می کند و در پایان دتانت میعان تازه ای ایجاد می شود و در این حالت است که در پایان رفت پیستون آب مایع وجود دارد. دو حالت آخری، بویژه دومی، حالت های بدی هستند.

در واقع به هنگام فرار بخار، چه اتفاقی می افتد؟ فشار یکباره افت می کند، چنانچه جدار ماشین خشک باشد مقداری گرما برای ایجاد تعادل گرمایی با کندانسور، نه بیشتر، از جدار دیگ منتقل می شود. اما چنانچه جدار مرطوب باشد آبی که اطراف آن است شروع به جوشیدن می کند و گرمای لازم برای تبخیر را از جدار می گیرد. آیا آقای هیرن این پدیده را سرد شدن در کندانسور نامیده است؟ این بزرگترین ریشه همه آشفتگی هایی است که جدار در چرخه ایجاد می کند. خشک بودن فلز جدار و سیلندر در لحظه شروع فرار است که کار ماشین را اقتصادی می کند. این نتیجه مهمی است که کارهای آقای هیرن رسیدن بدان را ممکن ساخت و پیشگامان سالهای ۱۸۴۱ - ۱۸۴۳ تنها در حد شک بدان نزدیک شده بودند.

پس از پایان فرار، آخرین بخش مسیر برگشت، به طور عادی، در ماشینهای صنعتی، فاز کوتاه تراکم است. این فاز برخلاف قبلی، اگر با آرامش کامل انجام گیرد تا کار اضافی جذب نکند، به



شکل ۲۰. نمودار تبدل‌های گرمایی در داخل سیلندر.

چهارگوشه‌های نقطه‌چین در بالای محور افقی حجمها، مقدار گرمایی را نشان می‌دهند که بخار به جدار منتقل می‌کند (محوطه‌های واقع در بالای محور طولها)؛ همین چهارگوشه‌های در پایین محور طولها مربوط به مقدار گرمایی است که جدار به بخار پس می‌دهد. چرخه واقعی، که با چرخه رنگین بویژه با داشتن تراکم نهایی در  $DA$  ممتاز است. در  $aba'b'$  جدار با بخار ورودی گرم می‌شود. در  $bc'b''c''$  جدار به هنگام دتانت، بخار را گرم می‌کند. در  $cde'd'$  اتلاف گرما در کندانسور به هنگام فرار بخار است. در  $ada''d''$  جدار به هنگام تراکم بخار گرم می‌شود.

سود چرخه تمام می‌شود. در واقع تراکم سبب گرم شدن جدار می‌شود که کاهش میعان اولیه ضربه بعدی را در پی دارد.

این وصف کلی کار است، آقای دولش‌اوورس دری نمودار بسیار جاننداری از آن تهیه کرد و آن را بر نمودار نشانگر منطبق ساخت (شکل ۲۰)

مسائل حل شده ۱. داغی بخار: در زمانی که هنوز از خواص فیزیکی بخار اطلاع کاملی نداشتند در اندیشه داغ کردن آن بودند. مگر نه اینکه پاپن القا می‌کرد که موتور برای هر ضربه، آهن سیلندرش تافته شود (طرح سال ۱۷۰۷)؟ در این باره اندیشه صریحتری در سال ۱۷۹۶ به میان گذاشته شد،

زمانی که فیلیپ لوبون پیشنهاد کرد که «بخار آب را از لوله تافته شده‌ای بگذرانند تا انبساط بسیار زیادتری داشته باشد». کاربرد واژه انبساط القا می‌کند که این مخترع فرانسوی نوعی انبساط با فشار ثابت را در نظر داشته است - که نظر درستی است؛ چنانچه منظور مخالف را داشت بدون تردید می‌نوشت: نیروی منبسط شده بسیار زیادتری.

بعدها کلمه داغ شدن در بسیاری از ثبت اختراعات، یا طرحهایی که احیاناً منجر به ساخت پیش‌نمونه شده است دیده می‌شود. در اینجا باید به دیگهای بخار تندجوش توجه خاصی داشت، زیرا وضع آنها طوری است که طبیعتاً بخارهای داغ می‌دهند. به همین دلیل است که آقای جیکوب پرکینز در چارچوب طرحهایش درباره ماشینهای بخار با فشار زیاد که با بخار یک دیگ تندجوش تغذیه می‌شد به این مسأله علاقه‌مند شد. وی حتی در آنالیز خواص بخار داغ مقدار زیادی به پیش رفت و در سال ۱۸۳۷ نوشته است که این بخار می‌تواند، بدون اینکه میعان یابد، مقداری کالریک از دست بدهد؛ برخلاف بخارهای اشباع شده که کمترین سقوط دما در آنها با میعانی برابر جبران می‌شود.

در فرانسه، آقایان توماس و لورنس در سال ۱۸۳۹ با تولید بخار داغ  $350^{\circ}$  درجه صد بخشی زغال حیوانی را احیا کردند. این کاریکی از نخستین نمونه‌های کاربرد این بخار بود؛ گرچه روشن است که این کار هیچ ربطی به نیروی حرکت‌دهنده نداشت.

در سال ۱۸۴۳ آقای جوزف گیل<sup>۱</sup> انگلیسی نیز در کاربرد بخار داغ به مناسبت مقدار گرمای اضافی آن اندیشید. وی چرخه‌ای بدین ترتیب ارائه می‌دهد: میعان اولیه، تجدید تبخیر در کندانسور. بنابراین می‌توان وی را در ردیف توماس، لورنس و کومب از پیشگامان نظریه تجربی دانست. متأسفانه، همان‌طور که آقای تستونر در چهل سال بعد ادعا می‌کرد، وی این پدیده‌ها را نه به اثر جدار، بلکه به حضور همیشگی آب مایع شده در سیلندر نسبت داد.

چند نمونه بالا استثناهایی هستند که شایسته یادآوری می‌باشند. به‌طور کلی آنچه که کاربرد بخار داغ را پیشنهاد می‌کرد برای خشک‌سازی بخار و براساس افسانه‌ای بود که در گذشته آن را گوشزد کردیم و طبق آن آبهای همراه می‌توانستند تا چند ده درصد افزایش یابند.

در ماشینهای پیستوندار بخار تا چه اندازه از بخار داغ استفاده می‌شد؟ باید گفت که بسیار کم، زیرا مکانیسمها این نوع را بخوبی تحمل نمی‌کردند. نمی‌توانستند دمای بخار را خیلی زیاد بالا برند و از سوی دیگر، در لوله‌های باریک داغ کردن بخار، پدیده‌های تجزیه آب ایجاد می‌شد که در نتیجه آن قطعات اکسید آهن تشکیل می‌شدند که همراه آب بخار شده و قطعات مکانیکی را

1. Joseph Gill

خراب می‌کردند.

با این حال، از سال ۱۸۵۸ تا ۱۸۷۰ نوعی بخار داغ متوسط کاربردی تقریباً عمومی در موتورهای کشتیها دارای فشار متوسط - رایج در آن زمان - یافت. مزایای واقعی این روش، تحمل‌ناپذیری آهن ماشین را نادیده می‌گرفت، اما زمانی که انبساط دوگانه و وجود کندانسور در سطح عملی شد و نیز نیاز به کاربرد پوشه بخاری و گرمساز بخار میانه کار، رسیدن به نتایج مطلوب با ناراحتیهای کم را ممکن ساختند داغ کردن بخار کنار گذاشته شد.

کاربرد ماشینهای با بخار داغ در خشکی تقریباً هیچ بود. وجود ماشین لوگلباخ که به مدت چند ده سال با بخار داغ کار می‌کرد در این حکم خللی ایجاد نمی‌کند. محققاً این ماشین نوعی موتور کارخانه‌ای بوده است، اما در همان حال هم یک وسیله آزمایشی، که جهت انجام دادن آزمایشهای عملی ساخته شده بود.

در آخرین دهه سده نوزدهم، شاهد تجدید کاربرد بخار داغ در لوکوموتیوها، و نیز در زمین - اما در شرایطی کاملاً متفاوت می‌باشیم؛ زیرا درباره توربینها سخن می‌گوییم.

در قسمت لوکوموتیوها، ماشین بخار داغ اشمیت سر برآورد که در لوله‌هایی جا داشت؛ سال ۱۸۹۸ آغاز رواج عمومی این روش بود. ما بعداً در این باره در فرصت مربوط به تحول دیگهای بخار لوکوموتیو باز سخن خواهیم گفت. اما در سال ۱۸۴۰ آقای هاثورن، ماشین‌ساز پرآوازه انگلیسی آن را پیشنهاد کرده بود. باید درک کرد که چرا برای لوکوموتیوها نوع بخار داغ بر نوع پوشه بخاری ترجیح داده شد. مقدار گرمایی که یک پوشه بخاری در دمای مشخص می‌تواند منتقل کند متناسب با سطح آن است، درحالی‌که قدرتی که در سیلندر ایجاد می‌شود بستگی به سرعت پیستون دارد. اما در لوکوموتیوها این سرعت به شکل استثنایی بالاست. از این مقدمه نتیجه‌گیری می‌شود که مقدار گرمایی که پوشه بخار می‌تواند انتقال دهد نسبت به توان ایجاد شده، کم است. اما در مقابل باید گفت که با کاربرد بخار داغ می‌توان با هر ضربه پیستون، مقدار بسیار زیادی گرما در سیلندر وارد کرد و این مقدار باز با سرعت پیستون متناسب است.

در مورد کاربرد بخار داغ در ماشینهای ثابت باید گفت که این روش به طور قطعی در ۱۸۹۰ عملی شد، اما ویژه توربینها، یعنی به شکل کاملاً دیگری، بود.

در حقیقت، در یک ماشین بخار پیستوندار، بخار داغ، همان‌طور که هم اینک گفته شد، تنها این نقش را دارد که در زمان ورود بخار به سیلندر، بدون اینکه میعانی ایجاد شود، گرما را به سیلندر انتقال دهد. بدین ترتیب، از به هم خوردن چرخه کار در اثر جدار جلوگیری می‌شود. اما در توربینها اثر

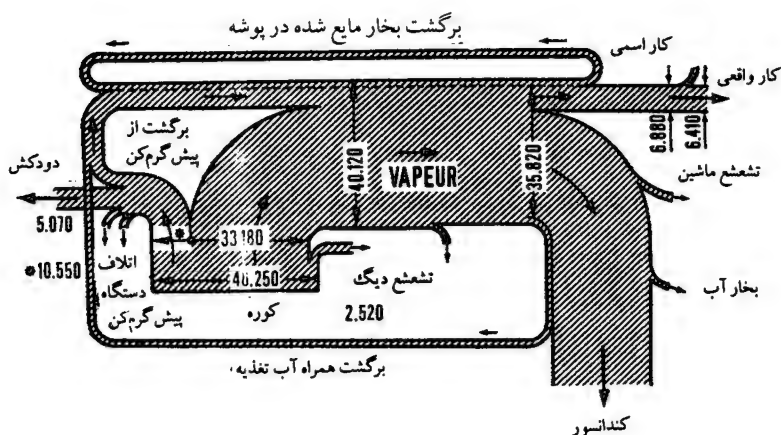
جدار وجود ندارد و مکانیسم در دمای ثابت کار می‌کند. بدین ترتیب، بخار داغ نقش ترمودینامیکی خود را اعمال می‌کند. جداسازی منبع سرد از منبع گرم را افزایش می‌دهد.

چند کلمه‌ای هم دربارهٔ گرمسازی مجدد یا داغ کردن میانه؛ که در ماشینهای مرکب کشتی عملی می‌شد باید گفت. آقای یرنشت<sup>۱</sup> که به سال ۱۸۱۷ یک کشتی بخاری با ماشین وولف ساخته بود، ظاهراً نخستین کسی است که این روش را به‌کار گرفته است. آقای رونتگن هلندی که در فرصت مربوط به ماشینهای دو انبساطی از وی سخن خواهد رفت؛ نیز آن را به‌کار برده است. اما این بژامن نورمن بود (که درباره وی هم در آینده خواهیم گفت) که این روش را به سال ۱۸۶۰ معمول داشت. گرمسازی مجدد و ملایم در بالا دست طبقهٔ دارای فشار کم، بشرطی که به دماهای بالا نرسد نتایج بسیار مفیدی می‌دهد. برای طبقه بالا، بهتر است از پوشه استفاده شود. ما گرمسازی مجدد میانی را که روی توربینها عمل شده است با عنوان داغی مجدد، بررسی خواهیم کرد.

پوشهٔ بخاری: در گذشته به پوشهٔ بخاری اشاره‌ای شده است. در واقع، در پرتو نظریهٔ تجربی، فهمیده شد که نقش این پوشه، که مدت‌ها مرموز مانده بود، تفاوت بنیادی با نقش داغ کردن بخار ندارد. وظیفه هر دو در حقیقت: تهیه مقدار گرمای لازم برای جلوگیری از میعان اولیهٔ بسیار زیاد است. بنابراین، پوشهٔ بخاری نقش فعالی دارد، چیزی که از مدت‌ها پیش، برسان دقیق ماشین بخار با در نظر گرفتن مقدار آبی که در اینجا مایع می‌شد اظهار داشته بودند. اما گرچه این پوشه مقداری گرما مصرف می‌کند، بهترین استفاده از این گرما را ممکن می‌سازد.

همان‌طور که می‌دانید این پوشه اختراع وات بود و پس از وی کم‌وبیش به فراموشی سپرده شد و در عیجوبی از آن می‌گفتند که تنها تأثیر آن، افزایش سطح تشعشع است. ماشین‌سازان دیگری آن‌قدر کاربرد آن را به غلط فهمیده بودند که بخار خروجی را دور ماشین می‌گردانیدند. همان‌طور که گفته‌ایم، کارهای نخستین، که نتیجه آنها تشکیل نظریهٔ تجربی بود، بقصد ترویج دوبارهٔ پوشه بخاری نوشته شده بودند. در حقیقت در اواسط این سده بود که سازندگان ماشینهایی از نوع وولف و کورنوال لجوجانه به پوشه وفادار ماندند.

ماشین بخار، صنعتی رام شده: در اواخر سدهٔ نوزدهم، وضع کلی تغییر یافت. مهندسان مأمور یک طرح، اینک دارای کارتهای برنده‌ای بودند که براحتی می‌توانستند با آنها بازی کنند. این کارتها عبارت بودند از: (۱) داغ کردن بخار؛ (۲) پوشهٔ بخار زنده؛ (۳) انبساط چندگانه، که بعدها آن را تحلیل خواهیم کرد. مکانیسم هریک از این روشها آن اندازه شرح داده شده‌اند تا اینکه بتوان برای رسیدن به نتیجه‌ای مشخص، آنها را با موفقیت با یکدیگر ترکیب کرد. بدین ترتیب ما از زمانی که ماشین



شکل ۲۱. ترازنامه کاربرد حرارت در یک ماشین پیستوندار، حدود سال ۱۹۰۰  
کوره در هر دقیقه ۴۶۲۵۰ کالری تولید می‌کند که ۶۴۱۰ کالری آن به کار مکانیکی مفید تبدیل می‌شود؛  
یعنی بازدهی برابر ۱۴٪ به اهمیت اتلاف کندانسور توجه کنید، حدود ۳/۵ گرمای تولید شده کوره است.

بخار، گرچه نسبتاً کامل بود در واقع هنوز برای کسانی که با آن کار می‌کردند ناآشنا بود بسیار دور  
شده بودیم. برای این تغییرات چه محدوده زمانی می‌توان تعیین کرد؟ حدود سال ۱۸۹۰ صنعت  
ماشینهای بخار را می‌توان به اندازه کافی رام شده دانست. اصطلاح دیگری صراحت کمتری دارد:  
تتها می‌توان یادآور شد که حدود سال ۱۸۴۰ بود که مسایل را، ناگزیر، روی مرز امکان نظری و  
امکان عملی قرار می‌دادند. بدین ترتیب - شاید از این تاریخ طولانی ماشینهای بخار بتوان چنین  
نتیجه گرفت - برای اینکه Software (نرم افزار) با hardware (سخت افزار) همراه شود، کمتر از  
نیم سده کافی نبود (شکل ۲۱).

## مسأله دتانت

### دتانت یک سیلندری

دتانت (کاهش فشار) و کاربرد آن: در اواسط سده نوزدهم، پس از مدتهای زیاد به استفاده‌ای  
که از کاهش فشار بخار ماشین به دست می‌آید پی بردند و به طور وسیعی آن را به کار گرفتند. اما بالا  
بردن فشارهای کاری دیگ، که ویژه نیمه دوم این سده است تغییرات بزرگی در مکانیسم را سبب  
شد.

آقای وات دتانت را تعریف کرده و آن را به ثبت رسانیده است (رجوع کنید به مجلد سوم). اما وی فشار اتمسفر را به عنوان فشار نخستین و خلاء یک کندانسور در دمای حدود ۴۰ درجه را به عنوان فشار نهایی معرفی می‌کرد. بین این دو حد، کاربرد دتانت با ماشین بخار پیستوندار، سودی به همراه نداشت. به مقاطع بزرگی جهت عبور بخار منجر می‌شد و تنها به نیروهای ضعیفی دست می‌یافت. ثبت اختراع آقای وات گویا مخصوصاً در جهت سد کردن راه رقبای احتمالی بود.

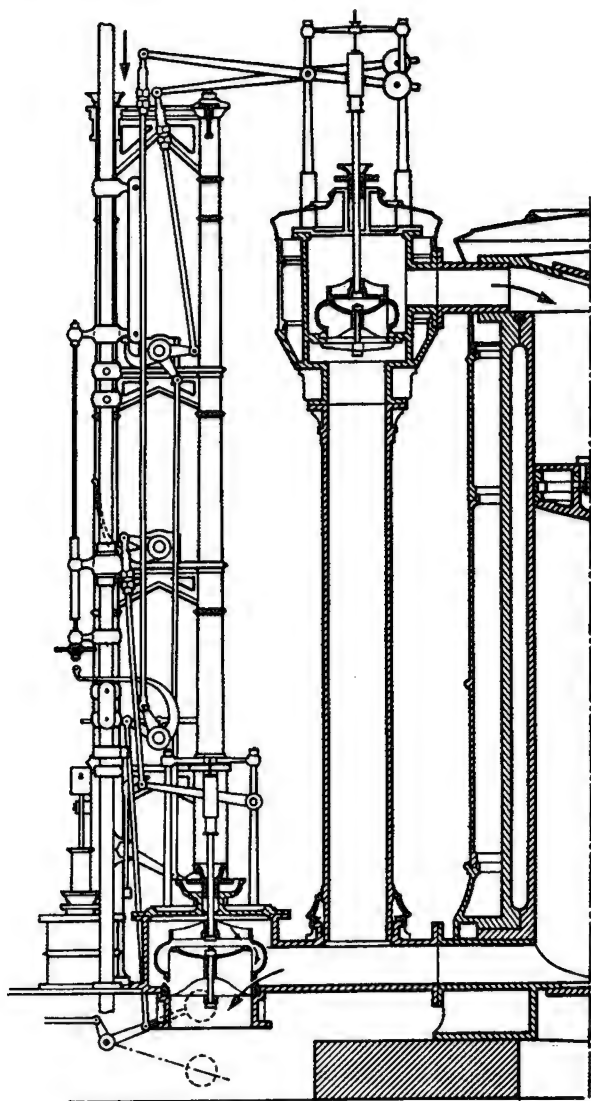
کاربرد واقعی دتانت تقریباً هم زمان با سده نوزدهم یعنی زمانی شروع شد، که بخار با فشار بیش از یک اتمسفر - ۲ تا ۵ اتمسفر در نیمه نخست این سده - مورد استفاده قرار می‌گرفت.

هر دو روش اساسی ایجاد دتانت یکباره پدید آمدند. یکی از آنها شامل راندن گاز در یک سیلندر با حجم بزرگتر بود، و این ویژه ماشینهای بخار دو یا چند انبساطی است که درباره آنها بعدها سخن خواهیم گفت. روش دیگر بستن راه ورودی بخار پیش از زمانی که پیستون به انتهای مسیر خود برسد. روش اخیر را دتانت یک سیلندری می‌گویند که اینک بدان می‌پردازیم.

ماشینهای کورنوال: کهنترین ماشینی که با روش دتانت یک سیلندری کار می‌کرد تلمبه‌های کورنوال بودند، تلمبه‌های یکطرفه بزرگی که مآخذ آنها در مجلد پیشین بررسی شدند. تبلیغاتی که در سال ۱۸۳۵ به سود تلمبه‌ای که در محل فاولی کنسولز<sup>۱</sup> نصب شد انجام گرفت به یک اندازه خوش‌بینی و بدبینی ایجاد کرد. و آقای تامس ویکستید<sup>۲</sup> را برانگیخت تا برای مقایسه ماشین وات با یک ماشین کورنوال آزمایشهایی انجام دهد. این آزمایشها به حساب East London Waterworks در اولدفورد در حوالی لندن انجام گرفت. نتیجه این آزمایشها دو برابر و نیم به سود ماشین کورنوال نسبت به ماشین وات بود. این رقم در سال ۱۸۴۱ انتشار یافت و از این تاریخ به بعد ماشین کورنوال رواج روزافزونی یافت.

در این ماشینها طرز تأثیر بخار مانند ماشینهای اولیه یکطرفه وات بود. توزیع بخار بوسیله سوپاپها مثل همان ماشین سازنده اسکاتلندی، بود، اما این سوپاپها که تغییر شکل خوبی به آنها داده شده بود، عمل دتانت را ممکن می‌ساختند. درواقع ورود و خروج بخار را سوپاپهای معینی تنظیم می‌کردند: حرکت این سوپاپها در ماشینهای قدیمی نیوکامن بوسیله قطعه‌ای به نام *plug-rod* هدایت می‌شد و آن عبارت بود از یک میله عمودی آویزان از شاهنگ. در این مکانیسم، معلوم است که زبانه‌هایی که روی این میله ثابت شده بودند، اهرمهای سوپاپها را در حین گذر خود معلق می‌کردند. تنها کافی بود که زبانه مربوط به سوپاپ ورود بخار را در جای درستی قرار داد و تا پیش از پایان مسیر، سوپاپ بسته شود (شکل ۲۲).

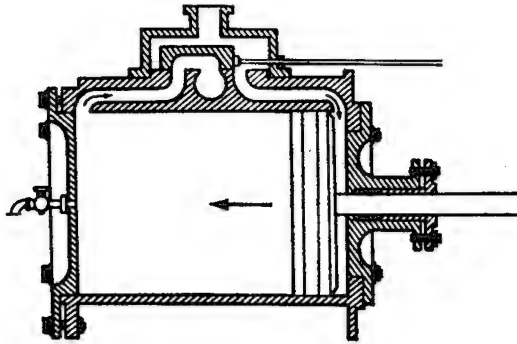




شکل ۲۲. ماشین کورنوال

سمت راست: نمای برشی از سیلندر و ستون توزیع بخار بایک سوپاپ؛

سمت چپ: مکانیزم توزیع بخار. در انتهای سمت چپ، میله حامل زبانه‌ها دیده می‌شود این میله با اهرمهای گوناگون به سوپاپها فرمان می‌دهد. یک چرخ طیار با تأثیر روی یک پیچ سبب جابه‌جا شدن این زبانه‌ها می‌شود. سوپاپ بالا اگر در وسط باشد تعادل برقرار است. اگر این سوپاپ بسته شده باشد دتانت شروع می‌شود. در پشت صحنه، سوپاپ ورودی گاز بسته شده است (پیدا نیست). در پایین سمت چپ، سوپاپ فرار بخار باز است.



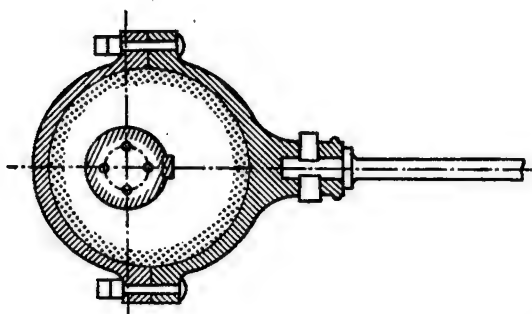
شکل ۲۳. سیلندر ماشین بخار دو طرفه، توزیع بخار با کشوی کاسه‌ای.

بخار از راه لوله‌های بالا از دیگ وارد ماشین می‌شود. فرار بخار از زیر کاسه در لوله‌ای که عمود بر این نقشه است انجام می‌گیرد.

به‌عنوان مثال، ماشینی را که مؤسسه لوکروزو و در سال ۱۸۵۲ ساخته بود بررسی می‌کنیم. این ماشین از نوع کورنوال و مربوط به تأسیسات شایو بود که در آغاز امپراطوری دوم به‌جای ماشینهای کهنه وات بوسیله برادران پریه کار گذاشته شد. قطر داخلی استوانه  $1/8^{\circ}$  متر و طول رفت پیستون  $2/45$  متر بود. برای این نوع ماشینها این ارقام عجیب نبود. سرعت حرکت پیستون معمولاً ۶ تا ۸ ضربه در دقیقه بود. در سال ۱۸۶۲ مصرف زغال در هر ساعت برای هر اسب  $2/65$  کیلوگرم بود که مقدار بالایی است. فشار کاری دیگ  $3/5$  اتمسفر بود. در مورد دتانت، چنین می‌نماید که اغلب چهاردهم بخار ورودی، یعنی نرخ آن  $2/5$  بود. نتایجی که آقای ویکستید ارائه داشت بهتر بود، اما در آزمایشهای این‌چنینی و شرایط عادی کار، تفاوت زیادی وجود دارد.

توزیع بخار بوسیله کشو: ما توزیع بخار با سوپاپها را شرح دادیم. بخش بسیار بزرگی از سده نوزدهم از توزیع بخار با کشوی کاسه‌ای برخوردار بود. لزوم کاربرد دتانتی که در خور توزیع بخار با کشو باشد مشکلات بزرگی پدید آورد.

کشوی کاسه‌ای یک قطعه توخالی (خود کاسه)، با حرکت متناوب بود که روی آیینه‌ای صیقل یافته و دارای سه سوراخ می‌لغزید. در شکل زیر طرز کار کشوی کاسه‌ای روشن می‌شود (شکل ۲۳). این کشو معایبی داشت که بعدها آنها را بررسی خواهیم کرد. استقبال عمومی از آن به علت مزایای جدی آن بود. این کشو جفت و جذب می‌شد زیرا فشار دیگ بخار، کاسه را روی آینه می‌چسبانید. وانگهی فرسایش آن سبب جفت و جذبی بیشتر می‌شد، زیرا بخشهایی که به یکدیگر مالیده



شکل ۲۴. لنگ هلالی روی محوری عمود بر صفحه تصویر سوار شده است.

می شدند بیشتر صیقل می یافتند.

فرمان کشو: بزرگترین عیب کشو این بود که حرکت کاسه نمی توانست بسیار سریع باشد. در نتیجه، آن چیزی که اتلاف مقطع مؤثر نامیده می شد اتفاق می افتاد؛ یعنی مجراهای بخار مدتی بسته یا نیم باز می ماند.

در نیمه نخست سده نوزدهم در ماشینهای با انبساط دوگانه که آقای وولف اختراع کرده بود با فرمان دادن به کشو به کمک یک بادامک این عیب تا حدودی برطرف شد. این بادامک مثلی شکل با اضلاع هلالی بود که در یک کادر چهارگوش جای داشت. با این وسیله کشو سریعاً از یک موقعیت به موقعیت دیگر انتقال می یافت و در پایان مسیر متوقف می شد. اما اشکالات بزرگ ساخت آن، سبب شدند که این بادامک وولف کنار گذاشته شود.

لنگ هلالی: در واقع فرمان به طور کلی بوسیله یک لنگ هلالی عمل می کرد و حرکتی سینوسی به کشو القا می نمود (شکل ۲۴) بنابراین در پایان مسیر، سرعت در حداقل و در میانه مسیر، حداکثر بود. مقطع مؤثر دو ثلث بود در حالی که با روش بادامکی که شرح آن گذشت سه چهارم. کشو و دستگاه فرمان خارج مرکزی آن، در سالهای ۱۷۹۹ - ۱۸۰۱ در محفل اطرافیان وات شناخته شده بودند. شکی نیست که آنها لزوم اتصال قائم لنگ به بازوی حرکت دهنده را دفعتاً احساس کردند تا اینکه حداکثر سرعت کشو با حداقل سرعت پیستون یا حداقل سرعت کشو با حداکثر سرعت پیستون همزمان باشد.

پوشش: برای اینکه در هر زمان و بویژه در اواسط مسیر، آب بندی کشو تأمین شده باشد می بایست به دوره کاسه، لبه هایی اضافه می شد. تا قطر آنها کمی بزرگتر از سوراخهای ورود بخار باشند. این

کار را پوشش دادن می‌نامیدند. از آغاز پیدایش کشتو، یک پوشش بسیار نازک مطمئناً لازم به نظر آمد، بعدها از سرنوشت نهایی پوشش آگاه خواهیم شد.

پیش‌افتادگی: اگر قطعه لنگ فرمان دقیقاً با زاویه ۹۰ درجه به باز و متصل می‌شد، با در نظر گرفتن پوشش، زمانی که پیستون به سوی انتهای مسیر خود حرکت می‌کرد در بخش بزرگی از مسیر خود از تأثیر بخار آزاد بود و بویژه برای فرار بخار غیرفعال ضربه پیشین هیچ منفذی وجود نداشت. بنابراین، ترتیبی داده شد تا اینکه کشتو، پیش از اینکه پیستون حرکت خود را به سوی هر یک از دو سر مسیر آغاز کند منفذ ورود بخار یا فرار آن را باز نگهدارد. این امر با دستکاری زاویه اتصال لنگ، حاصل می‌شد. مقدار اضافه بر ۹۰ درجه این زاویه را مکانیسین‌های قدیم، پیش‌افتادگی می‌نامیدند. منشأ پیش‌افتادگی زیاد شناخته شده نیست. لزوم آن با سریع‌تر شدن حرکت ماشین ضروریت می‌شود و احتمالاً در انگلستان در حدود سال ۱۸۲۹ ضمن کار استیونسن بدان پی‌بردند. مؤلفی از فرانسه با دیدن لوکوموتیوهای انگلیسی در سال ۱۸۳۵ از آن نام برده است. با این همه چنین می‌نماید که کاربرد آن در فرانسه به ابتکار مکانیسین‌های انگلیسی مأمور لوکوموتیوهای نخستین راههای فرانسه، بویژه در ناحیه پاریس در سال ۱۹۳۷ بوده است.

نتیجه می‌گیریم که کاربرد پوشش و نیز پیش‌افتادگی در مراحل مختلف کار سیلندر، نتایج زیر را داشت:

۱. ورود زودتر بخار، پیش از آنکه پیستون مسیر مقاوم، و فاز تراکم را به پایان رساند. پیستون در واقع رفت خود را علی‌رغم بخاری که از دیگ می‌رسید به پایان می‌رسانید. این تراکم چنانچه متعادل باقی می‌ماند مفید بود؛ زیرا حرکت این مکانیسم را آرام می‌ساخت و ایجاد تعادل فشار بین دیگ بخار و سیلندر را شتاب می‌داد.

۲. ضربه حرکت دهنده: ورود بخار و سپس دتانت.

۳. خروج پیش از موقع، پیش از آنکه پیستون ضربه حرکت‌دهنده خود را به پایان رساند. در اینجا نیز عجله در خروج چنانچه آرام انجام گیرد مفید بود. این وضع با حضور فشار متقابل در آغاز ضربه مقاوم مقابله می‌کند.

۴. ضربه مقاوم: خروج بخار.

تحول با ترتیب زمانی: طرز کار یک توزیع‌کننده کشویی شرح داده شد. به طوری که هم‌اکنون خواهیم گفت، چنین مکانیسمی تنها در حدی می‌تواند برای عمل دتانت آمادگی داشته باشد که دتانت از میزان متعادل فراتر نرود. بنابراین، در تاریخ ماشینهای یک سیلندری دارای دتانت، دو مرحله

تشخیص داده می‌شود: ۱) دوران نخستین که در سالهای ۱۸۳۵ - ۱۸۴۲ آغاز می‌شود. در این دوران از کشو با مقداری دستکاری استفاده می‌شد؛ ۲) دوران دوم که پس از سال ۱۸۷۰ است، طی این دوران، کشو به علت بالا رفتن فشارها کنار گذاشته شد.

دتانت ثابت به کمک پوشش: با افزایش پوشش خارجی کشوی کاسه‌ای می‌توان بخشی از دتانت به دست آورد. یک مؤلف فرانسوی در سال ۱۸۴۰ توجه داد که این فرآیند پس از چندی در انگلستان روی لوکوموتیوها متداول شد.

ناراحتیهای مربوط به پوشش، ناشی از این واقعیت بود که کشو که متقارن بود، تراکم و خروج پیش از موقع را افزایش می‌داد. دتانت در واقع در ثلث پایانی مسیر پیستون انجام می‌گرفت. این وضعیت در آن زمان برای استفاده‌های عمومی بویژه در لوکوموتیوها، رضایتبخش بود.

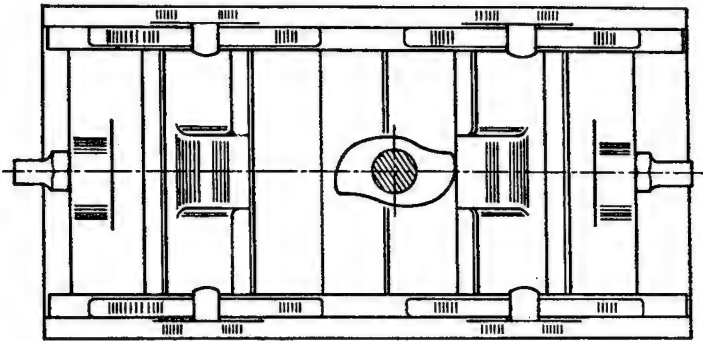
دتانت تنظیم‌پذیر: علاقه زیادی برای کنترل کردن میزان دتانت، در صورت متغیر بودن بار، در زمان کار ماشین بخار ابراز می‌شد. در اینجا هم لوکوموتیوها بویژه مورد نظر بودند. سیستم تنظیم‌پذیر بودن دتانت در سالهای ۱۸۴۰، به هنگام گسترش زیاد راه‌آهن مورد بررسی فراوان قرار گرفت.

انواع راه‌حلها به‌کار گرفته شدند که از آن میان بویژه دو راه‌حل مورد توجه قرار گرفتند. راه‌حل نخست در واقع اضافه کردن یک قطعه تکمیلی به کشو معمولی بود، این قطعه در زمان دلخواه ورود بخار را سد می‌کرد. ماشین‌سازان پرآوازه متعددی، بویژه ادواردز، پس از وی آقای میبر بخصوص فارکو مکانیسمهایی را طرح کردند که به علت نداشتن استحکام لازم، مدت زیادی روی لوکوموتیوها تاب نیاوردند اما مدتها روی ماشینهای ثابت بخار و ماشین بخار کشتی به‌کار می‌گرفتند (شکلهای ۲۵ و ۲۶).

کولیس: در مورد لوکوموتیوها، وسیله‌ای که بسیار مهم شمرده می‌شد کولیس استیونسن بود، وسیله‌ای که در واقع در سال ۱۸۴۲ بوسیله یک همکار جوان این ماشین‌ساز پرآوازه، که هاو<sup>۱</sup> نام داشت طرحریزی شده بود.

این وسیله در آغاز بیشتر برای تغییر حرکت ساخته شده بود. اما باید گفت که یک ماشین بخار دارای کشوی لنگ را، این وسیله تنها در یک جهت معین می‌توانست بگرداند. برای اینکه در جهت مقابل گردانده شود لازم بود که کشوی لنگ موقعیت متفاوتی را اشغال کند، موقعیتی که نسبت به بازوی حرکت‌دهنده متقارن با قبلی باشد (شکل ۲۷).

لوکوموتیوهای اولیه برای هر سیلندر، تنها یک لنگ آزاد شونده به توسط یک بوشن کلاچ داشتند. تغییر حرکت در توقف انجام می‌گرفت و مکانیسم می‌بایست زیر ماشین خود برود. بعداً

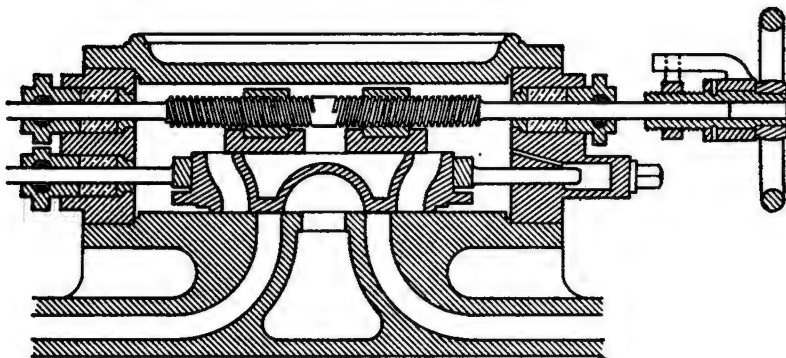


شکل ۲۵. دتانت فارکو

زائده‌ای به شکل خاص که در وسط قرار دارد دو نیم صفحه دتانت را کنترل می‌کند، و زمانی که زائده گردانیده می‌شود مسیر کم و زیاد می‌شود.

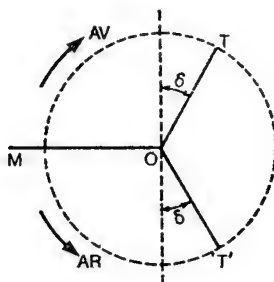
از سیستمی که دو لنگ داشت استفاده کردند رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۵۰۹). از آن پس مجهز بتوعی میله برگشت بخار شدند که از پلاتفرم ماشین فرمان می‌گرفت.

در کولیس استیونسن همان ترتیب لنگها ادامه یافت با این تفاوت که لغزنده‌ای قوسی شکل آنها را به یکدیگر مرتبط می‌ساخت (شکل ۲۸). کشتی در دو انتهای مسیر خود از طریق یکی از دو



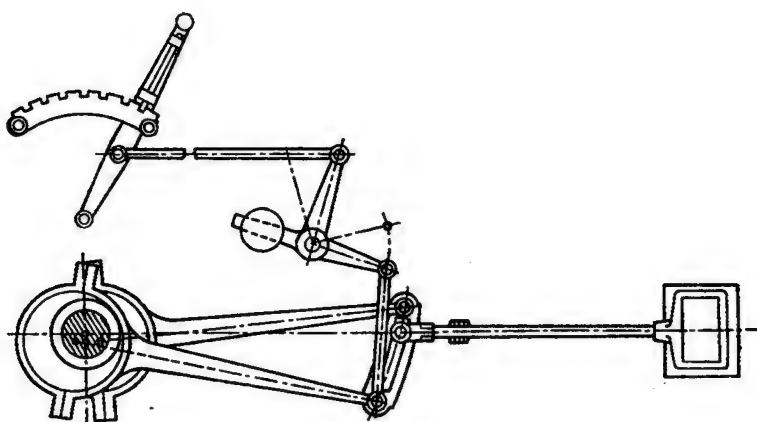
شکل ۲۶. دتانت میر، برش طولی

کشوی کاسه‌ای دارای دو مجرا، که دو نیم صفحه دتانت می‌توانند آنها را ببندند. در این شکل وقتی میله حامل دو دنده دو پیچ متقابل گردانیده شود جدایی صفحات تغییر می‌کند.



شکل ۲۷. لنگی حرکت پیش از T و لنگی حرکت پس از T' هر دو نسبت به خط عمود بر بازوی M دارای زاویه یکسان  $\delta$  هستند. مقدار این زاویه به علاوه  $90^\circ$  درجه، زاویه پیش افتادگی را تشکیل می‌دهد.

لنگ مستقیماً فرمان می‌گرفت. حرکت کشو در میانه راه برابر صفر بود؛ در این نقطه متوقف می‌ماند و هر دو دریچه ورود بخار را می‌بست. در دیگر نقاط مسیر، حرکت کشو چنان است که گویا از یک لنگ مجازی فرمان می‌گیرد و بسته به اینکه در کجای مسیر قرار گرفته باشد مسیر کوتاه یا طولانی دارد. اما باید گفت که در این لنگ مجازی، علاوه بر اینکه مقدار خروج از مرکز تغییر می‌کند، زاویه اتصال آن چنان تغییر می‌یابد که زمانی که به موقعیت وسط نزدیک می‌شود دتانت افزایش می‌یابد.



شکل ۲۸. کولیس استیونسن، آرایش کلی آن در سمت چپ: لنگهای حرکت پیش و پس. خود کولیس قطعه‌ای هلالی است که در وسط شکل دیده می‌شود. در سمت راست، کشو و میله آن است. در بالا، اهرم تغییر حرکت دیده می‌شود.

کولیس والسخائرتس: در مبانه این سده ترکیب کولیس استیونسون با کشویی که با کمی پوشش همراه می شد تقریباً تنها وسیله ای برای حرکت دادن لوکوموتیوها با دتانت تنظیم پذیر بود اما، علاوه بر این باید از کولیس والسخائرتس هم نام برد، وسیله ای که در سال ۱۸۴۴ طرحریزی و حدود نیم سده هیچ توجهی بدان نشده بود. در حدود سال ۱۸۹۵ کاربردی عمومی روی لوکوموتیوها یافت. در واقع زمانی که کشوها روی سیلندر گذاشته شدند آنها را هم بیرون آن قرار دادند و این مکان مناسبی برای کولیس در آن زمان شد (رجوع کنید مجلد سوم صفحه ۵۱۰).

توزیع بخار با ابزار زبانه ای: اینک به بررسی ماشینهای به اصطلاح چهار کشویی دارای ابزار زبانه ای می پردازیم؛ این ماشینها پس از سال ۱۸۷۰ غالباً در کار بودند.

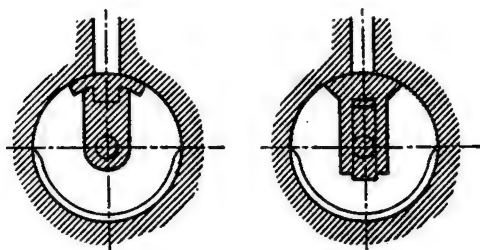
اصطلاح چهار «کشو» مربوط به ماشینهای دوطرفه ای است که ورود و خروج بخار بوسیله چهار شکاف مشخص و مخصوص انجام می گرفت. این شکافها در آن زمان با دمای ثابت کار می کردند و این امر اثر جدار را کاهش بسیار می داد. در واقع با فشارهای ۸ کیلوگرم که در این دوران متداول بود، تفاوت دمای ورود و خروج بخار در ردیف ۸۰ و ۱۲۰ درجه صد بخشی (سانتیگراد) بود.

این فکر جدا کردن شکافها قدیمی است. در سال ۱۷۹۶ سایه هایی از آن دیده شد و گاهگاهی در نیمه نخست سده نوزدهم به کار رفته است. اما این عمل تنها زمانی که بدان نیاز بود عمومیت یافت.

بخاربندها: کاربرد ماشینهای چهار کشویی معمولی در آن زمان، در واقع نوعی تناقض بود، زیرا این دوره با ترک کشوهای کاسه ای مشخص می شود. برای حرکت دادن کاسه ای که روی شیشه با فشار ۸ کیلوگرم و بیشتر قرار داشت کار زیادی لازم بود؛ وانگهی داخل کاسه و مجاری خمیده ای که از شیشه به سیلندر راه داشتند سطوح قابل توجهی را تشکیل می دادند که اثر جدار را با تمام قوا اعمال می کردند. بدین ترتیب، از این پس بخاربندهای گردان به کار گرفته می شد که با جابه جایی کم آنها و قرار گرفتن سطح کوچکی در معرض اثر بخار، سوراخهای بزرگی برای عبور گاز باز می شدند (شکل ۲۹) در این زمان از سوپاپهایی نیز استفاده می شد که ایجاد تعادل در آنها آسان بود.

دتانت گری: اصطلاح ابزار زبانه دار ناظر به بستن فوری ورود بخار در لحظه شروع دتانت است. در آن زمان در ماشین بخار کورنوال، حرکت سوپاپها نسبت به مدت زمان رفت آنها، همان طور که در گذشته گفته ایم، سریع بود. بعدها کوشیدند تا نتیجه ای مشابه با توزیع بخار با کشوهای نوع میر یا فارکو به دست آورند. در اینجا باید نامی هم از دتانت گری برده شود. این شخص مهندس شرکت





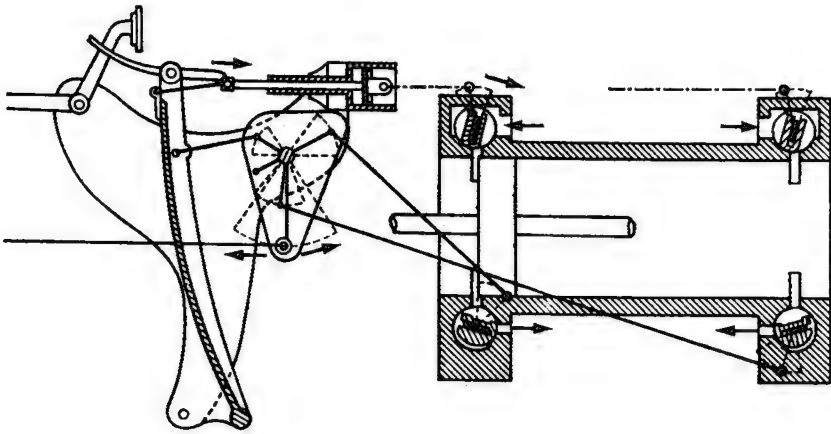
شکل ۲۹. بخاربندهای کورلیس. قطعه متحرک، نوسان دایره‌ای دارد.

پاول در شهر روان و کارشناس در ساخت ماشینهای پر قدرت وولف بود. دتانت کری تا زمانی که این نوع ساخت رواج داشت، یعنی مدت زیادی به کار گرفته می شد.

ساخت مکانیکی ابزار زبانه دار: به طور کلی همه ابزارهای زبانه دار دتانت، گرچه در اصل بسیار ساده هستند، ساخت پیچیده‌ای دارند. همیشه یک فنر عقب کشنده در آنها به کار می رفت که با پیمودن بخشی در مسیر بتدریج کشیده می شد. قطعه‌ای که یک رگولاتور محل آن را تعیین می کرد فنر را آزاد می ساخت و درجه و ورود بخار بتندی بسته می شد. کمک فنری پیستونی به نام *dash-pot* که با هوا یا روغن کار می کرد تکان دستگاه را کاهش می داد. مشکل اصلی که در اینجا دیده می شود در حقیقت مربوط به چگونگی طرح زبانه نیست بلکه طرز ساخت آن است که بتواند در سالهای زیاد میلیونها بار به طور دقیق عمل کند. در اینجا شخص سلاحهای آتشین را تداعی می کند که رشته‌ای از فعالیت را در بر می گیرند که خواص متضاد ظرافت و خشونت تقریباً به همین طرز با هم تلفیق داده شده اند. در ماشینهای بخار دارای ابزار زبانه دار، قطعات ضربه خور، آستری از فولاد با حداکثر سختی به دست آمده در آن زمان را داشتند.

دتانت تنظیم پذیر: جای قطعه حرکت دهنده زبانه را رگولاتور تعیین می کند و بدین ترتیب کم کردن مدت ورود بخار را به هنگام افزایش سرعت ممکن می سازد. این کاربرد رگولاتور از مکانیسمی که وات پیشنهاد کرده بود بسیار بهتر بود. طبق مکانیسم پیشنهادی وات، فقط دهانه لوله بخاری که از دیگ می رسید کوچک می شد؛ اما رگولاتور لزوم دتانت را آشکارا مطرح می ساخت.

ماشین کورلیس: آقای کورلیس نخستین اختراع خود را در ۱۸۴۹ به ثبت رسانید. وی هویت امریکایی داشت و مورخان آنگلو ساکسون افتخار اختراع دتانت تنظیم پذیر با رگولاتور را متفقاً به وی نسبت می دهند. در واقع فارکو در سال ۱۸۳۶ در این باره اختراعی را به ثبت رسانیده بود و پس از او آقای میر در حدود سالهای ۱۸۴۰ تا ۱۸۵۰ از وسیله‌ای شبیه بدان استفاده می کرد. اما



شکل ۳۰. شکل اجمالی توزیع‌کننده کورلیس با تیغه شمیری.

این مکانیسم را میل‌لنگی حرکت می‌دهد که خارج از شکل در قسمت چپ قرار دارد. بخاربندهای زبانه‌داری، در قسمت راست، در بالای سیلندر دیده می‌شوند. در بالا در سمت چپ، مکانیسم زبانه‌داری که رگولاتور آن را کنترل می‌کند، نشان داده شده است. در وسط شکل، کمک فنرهای از بین برنده لرزشهای بخار بند دیده می‌شوند.

سیستم وی تنها پس از سال ۱۸۷۰ همراه ماشینهای کورلیس واقعاً رواج یافت و به همین دلیل، اختراع آن به این شخص امریکایی نسبت داده شده است.

آقای جرج هنری کورلیس در سال ۱۸۱۷ تولد و در ۱۸۸۸ وفات یافت. ما، هم‌اکنون گفتیم که وی نخستین اختراع خود را در ۱۸۴۹ به ثبت رسانید. در زمینه ساخت ماشینهای دارای چهار توزیع‌کننده، وی هشت سال از هموطن خود آقای سیکلز<sup>۱</sup> (که در سال ۱۸۴۱ اختراعش را به ثبت رسانید) عقبتر بود. اما آقای سیکلز از سوپاپها استفاده می‌کرد - وسیله‌ای که بسیار بعد وارد عمل شد. بخار بندهای گردان به احتمال فراوان بوسیله کورلیس متداول شدند. گرچه امریکایی دیگری با نام گرین<sup>۲</sup> در حدود سال ۱۸۵۵ در به‌کار انداختن ماشین مورد بحث ما، نقشی داشته است.

به هر تقدیر، باید گفت که در نمایشگاه سال ۱۸۶۷ پاریس بود که ماشین کورلیس بخصوص، در اروپا شهرت یافت. رواج واقعی این ماشین در این دوره شروع شد (شکل ۳۰).

کورلیس از کار تکمیل اختراع خود لحظه‌ای غافل نبود و تا زمان مرگ خود انواعی از توزیع‌کنندگان بخار را پیایی پیشنهاد می‌کرد. سه نسل از ماشین وی شناخته شده‌اند که به ترتیب

1. Sickels 2. Green

عبارتند از: شمشیری، دارای بازوهای آویزان (یا بشقاب مرکزی) و بالاخره نوع پای عنکبوتی. این تکمیلها بمنظور افزایش مقدار بخار ورودی انجام می‌گرفت. کاری که توزیع‌کننده شمشیری از انجام آن ناتوان بود.

رواج در اروپا: نخستین امتیازدار ماشین کورلیس در اروپا آقای وان دن کرشو<sup>۱</sup> و از اهالی گان بود. وی حق امتیاز خود را در مورد فرانسه به آقای لوگاوریان<sup>۲</sup> از اهالی لیل وا گذاشت؛ این شخص یکی از قدیمیترین ماشین‌سازان فرانسه بود. این تجارتخانه نام کرپل<sup>۳</sup> به خود گرفت.

از سال ۱۸۷۰ در شهر لیل ماشینهای دارای ۵۰ تا ۴۰۰ اسب قدرت با موفقیت ساخته می‌شدند. برای یک ماشین ۱۳۰۰ اسبی مشخصات زیر ملحوظ می‌شد: فشار ۴/۵ اتمسفر، سرعت ۳۹ دور در دقیقه، قطر داخلی سیلندر ۹۱۰ میلیمتر، طول رفت پیستون ۱/۶۸ متر. مصرف ۱ کیلوگرم برای هر اسب در یک ساعت به‌طور رسمی تضمین شده بود.

در فرانسه همچنین می‌توان از ماشینهای کورلیس ساخت کروزو، از سال ۱۸۸۳ نام برد. نوع آن در پی تحقیقات تجربی که در همان کارخانه کروزو انجام گرفته بود تغییراتی یافت.

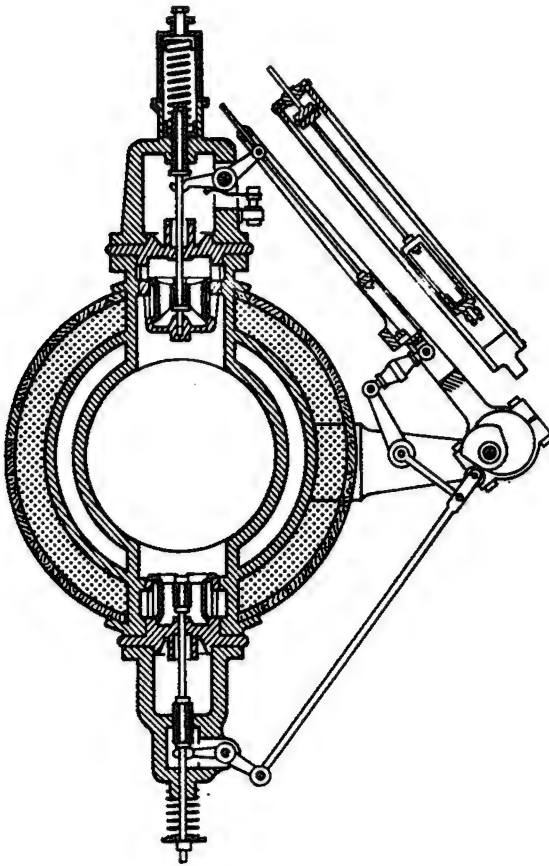
آقای فارکو که حقوقی را به‌دست آورده بود که ابتدا به آقای بد<sup>۴</sup> اهل ورویو تعلق داشت، جایزه بزرگ سال ۱۸۷۸ نمایشگاه پاریس را دریافت داشت و در سالهای ۱۸۸۹ نیز باز جایزه‌ای به وی تعلق گرفت و در سال ۱۹۰۰ م برای ساخت ماشینی با قدرت هزار اسب.

روشن است که آقای کورلیس در همه کشورها امتیاز و حق اقتباس ماشین خود را به دیگران واگذار کرده بود که شمارش آنها سودی ندارد.

توزیع بخار با سوپاپها: بویژه در کشورهای آلمانی زبان - آلمان، سوئیس، اتریش - بخاربندهای گردان درگیر مسابقه تنگاتنگی با سوپاپها بودند. سوپاپها نخست بوسیله تجارتخانه مهم برادران زولتسر دروینترور با دو ترتیب پیاپی در سالهای ۱۸۶۷ و ۱۸۷۸ به‌کار گرفته شدند و نیز درگان بوسیله آقای کارلز<sup>۵</sup>، دارنده امتیاز از زولتسر ساخته می‌شد (شکلهای ۳۱ و ۳۲).

با این ماشینها ما شاهد پیدایش میل سوپاپ برای فرمان دادن به سوپاپها هستیم - وسیله بسیار مشهوری که به موتورهای درونسوز به ارث رسیده است.

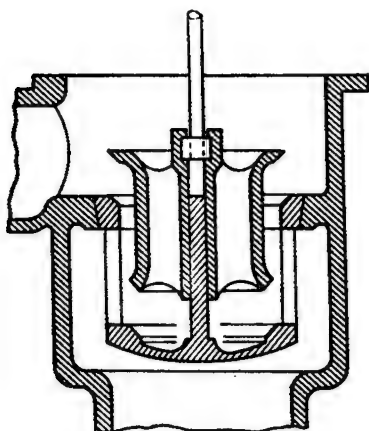
ماشینهای با جریان ثابت: برای اینکه بررسی ماشینهای یک سیلندری دارای دتانت بزرگ را به پایان بریم باید از دستگاه جالب دیگری که در ربع نخست سده بیستم بسیار رواج یافته بود نیز چند کلمه‌ای بگوییم. این دستگاه را ماشینهای با جریان ثابت یا فرار از وسط یا به اصطلاح



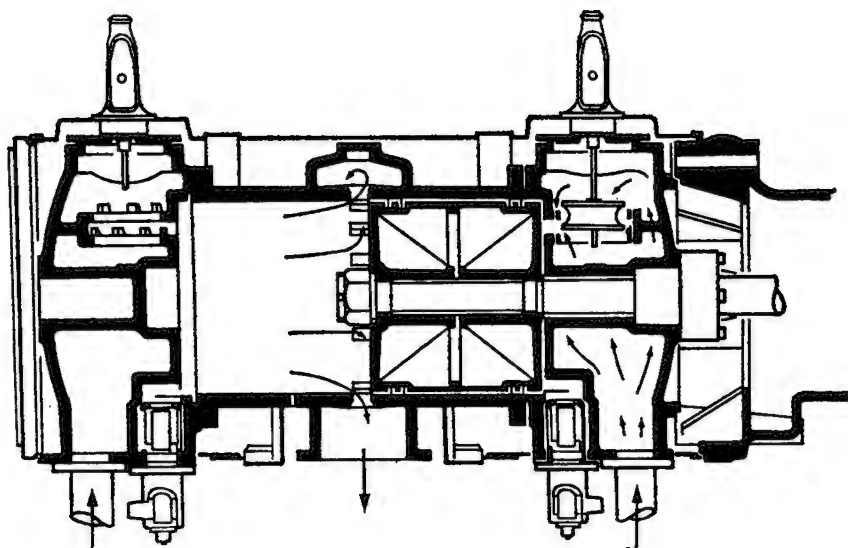
شکل ۳۱. ماشین سوپاپدار زولتسر.

برش عرضی سیلندر. سمت راست، میل سوپاپ. کمک فنرها، در بالا سمت راست، جداگانه نشان داده شده‌اند.

انگلیسیها uniflow engine می‌نامیدند. ورود بخار از دو سر استوانه انجام می‌گرفت، که یا از طریق بخاربندها یا بوسیله سوپاپها بود. فرار گاز در یک نقطه مسیر عملی بود، و آن روزهایی در وسط طول استوانه بود. همان‌گونه که دیده می‌شود، در این ترتیب طول پیستون ناگزیر باید برابر مسیر، منهای طول روزهایی فرار گاز باشد (شکل ۳۳) کمبودهای گرمایی با فشارهای زمانه چنان شدید بودند که سیلندرها به شکل دهانه بشکه ساخته می‌شدند و نابرابریها انبساط جدار آنها را



شکل ۳۲. سوپاپ زولتسر. با سوپاپهای شکل ۲۲ مقایسه کنید



شکل ۳۳. ماشین با جریان ثابت، برش طولی سیلندر.  
فرار بخار از روزنه‌هایی صورت می‌گیرد که به شکل تاج در وسط شکل دیده می‌شوند. کشوی استوانه‌ای سمت چپ، جلوی ورود بخار را سد می‌کند.

صاف می‌کرد.

اندیشه فرار بخار از وسط، در سده نوزدهم بارها مطرح شده بود و در پایان سال ۱۸۸۵ آقای تاد<sup>۱</sup> در انگلستان آن را به ثبت رسانید؛ اما ساخت آن مرهون آقای اشتومپ<sup>۲</sup> از شارلوتبورگ<sup>۳</sup> در سال ۱۹۰۸ است و تولید آن را نخست کارخانه ارسته برونر ماشین‌فابریک<sup>۴</sup> در برنو<sup>۵</sup> عهده‌دار شد. کاربرد الکتروتکنیک: طی ده یا پانزده سال پایانی سده نوزدهم گسترش سریع الکتروتکنیک حوضه جدیدی برای کاربرد ماشینهای بخار ثابت و پرقدرت گشود. نمایشگاه سال ۱۹۰۰ پاریس، اوج این رشته بود. این دوره همچنین عهد وسایل پرنده با عرض چند متری بود و همچنین می‌توان از گروههای ماشین‌ساز واقعاً غول‌آسای متعددی نام برد. در واقع زمینه تحول بعدی اینک آماده شده بود.

کاربردهای اولیه توربینهای بخاری روشن ساختند که در جهت افزایش سرعت و قدرت موتورهای و نیز کم کردن همه ابعاد آنها حرکت شده است.

تحول ماشینها بخار پیستوندار، در همه انواع آن، هم‌زمان با به پایان رسیدن سده نوزدهم متوقف شد. چنانچه به گروههای الکتروژن که در سال ۱۹۰۰ پدید آمدند نظری بیفکنیم همچنین می‌توان ادعا کرد که این واپس‌نشینی، ماشینهای یک سیلندری را بی‌اعتبار ساخت.

گروههایی که در نمایشگاه سال ۱۹۰۰ درخشیدند: در واقع در نمایشگاه سال ۱۹۰۰ پاریس، ۴۸ گروه الکتروژن شرکت داشتند که تنها هفت گروه از آنها ماشین بخار یک سیلندری را به نمایش گذاشتند. قویترین آنها دارای ۳۰۰۰ kW (با ماشینی دارای انبساط چندگانه) بود درحالی‌که قویترین گروه ماشین یک سیلندری قدرتش از ۷۵۰ kW (یک چهارم قبلی) فراتر نمی‌رفت. دقیقاً همین گروه است که با ماشین کورلیس فارکو (ظاهراً هزار اسبی) کار می‌کرد و همان‌طور که در پیش گفتیم جایزه بزرگ نمایشگاه را ربود. این ماشین سیلندری با ابعاد  $۱۰۰ \times ۱۳۵$  سانتیمتر داشت، هر دقیقه ۷۸/۵ دور می‌گردید. در فشار ۷ کیلوگرم و تنها با یک‌دهم بخار ورودی، قدرت اسمی آن به ۹۰۰ اسب می‌رسید.

در دوره‌ای که بررسی می‌کنیم موتورهای تا اندازه‌ای قوی عموماً دارای چند انبساط بودند. این امر نتیجه تحولی بود که در مرحله نخست در ماشینهای بخار کشتی پدید آمده بود و ما آن را در صفحات آینده توضیح خواهیم داد. اما پیش از آنکه بررسی دانات در سیلندر تکی را تمام کنیم باید خاطرنشان کرد که مهمترین اصلاحاتی که در این رشته انجام گرفتند و در بالا آنها را بررسی کردیم

1. Todd 2. Stumpf 3. Charlottenbourg 4. Erste Brünner Maschinenfabrik

۵. Brno شهری در چک‌واسلواکی، مرکز موراوی

دستاوردهای قطعی در این زمینه را تشکیل داده‌اند. مثلاً توزیع بخار با ابزار زبانه‌دار در ماشینهای مرکب دارای فشار زیاد به‌کار خود ادامه دادند درحالی‌که می‌توانستند کشور را جانشین آن سازند که برای ماشینهای دارای فشار متوسط ساده‌تر بود.

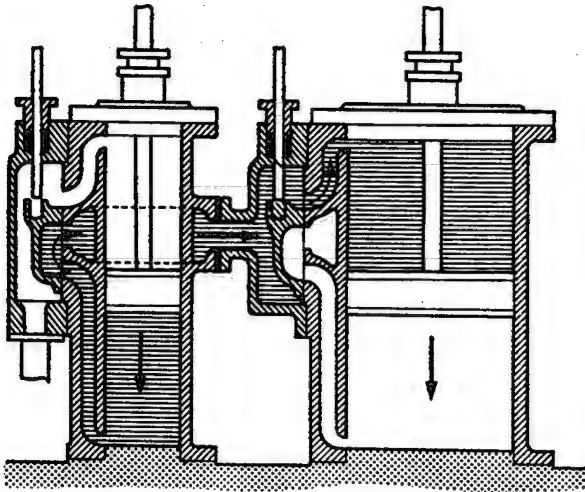
## انبساط دو یا چندگانه

دنانت مرحله‌ای: حدود سال ۱۸۷۰ که فشار کاری دیگ بخار به ۸ اتمسفر و حتی بیشتر از آن رسید کاهش متناسب فشار بخار در یک سیلندر ناممکن شد. لازم آمد که این دنانت را با اجرای آن در سیلندرهایی که حجم آنها بتدریج زیاد می‌شود مرحله‌ای کرد. کاری که در آن زمان مدتها بود در ماشین بخار وولف انجام می‌گرفت. این روش انبساط دو یا چندگانه - بسته به تعداد سیلندرها - نامیده شد. بهتر است مزایای این کار - که بیشتر در دو سیلندر انجام می‌گیرد - به اجمال باز نموده شود.

مزایای دنانت مرحله‌ای: در ماشین بخار یک سیلندری، حداکثر کار با فشار بخار ورودی و سطح پیستون متناسب است و تغییرات آن در جریان حرکت پیستون، نسبت مستقیمی با درجه دنانت دارد. در این محاسبه همه قطعات مسؤول در تغییر حرکت برای حداکثر کاری که باید تحمل کنند و علاوه بر آن یک چرخ طیار بسیار سنگین را نیز باید در نظر بگیرند. این مسأله تنظیم ضربه موتور بدون شبهه دلمشغولی پیشگامان دنانت دوگانه بوده است. به هر تقدیر در سال ۱۸۲۰ در کتابهای مکانیک انگلیسی و فرانسه این امر به صراحت خاطر نشان شده است.

از سوی دیگر، مرحله‌ای شدن دنانت منجر به مرحله‌ای شدن کاهش دما بین دو مرحله ورود و خروج بخار می‌شود. یک آزمایش بسیار دقیق از شرایط کاری ماشین در آن زمان، کاهش محسوس اثر جدار را ثابت کرد. بدون اینکه وارد جزئیات کار شویم، تذکر می‌دهیم که در چنین حالتی مقدار اتلاف در کندانسور به سیلندر کم فشار محدود می‌شود، که این خود مزیت عمده‌ای است. همین ملاحظات، مثل دیگر مسائلی که به اثر جدار مربوط می‌شوند تا زمانی که فشار بخار زیاد نبود آشکار نبودند؛ اما، در اواخر سده نوزدهم و اوایل بیستم، بویژه در ماشینهای کشتی، در طرحهای ماشینهای دارای قدرت زیاد و با صرفه، بنوعی عامل اصلی تبدیل شدند.

دو علت اصلی که مانع شده بودند که در ماشینهای پیستوندار، از بخارهای دارای فشار زیاد، بدون مرحله‌ای کردن دنانت استفاده برند گفته شده علت دوم بیش از اولی اهمیت داشت. در موتور درونسوز نابرابری کار صریحاً پذیرفته شده است و در اینجا با تکثیر سیلندرها - بدون مرحله‌ای



شکل ۳۴. برش سیلندرهای یک ماشین وولف. فرار بخار از سیلندر کوچک و ورود آن به سیلندر بزرگ.

کردن دتانت - مشکل را دور زده‌اند. اما موتور درونسوز با گاز کار می‌کند، یعنی سیال الاستیکی که از دمای میعان خود بسیار دور است، درحالی‌که ماشین بخار، همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، از بخار استفاده می‌کند که به دمای میعان خود بسیار نزدیک است. تغییرات در حالت‌های بینایی برای چنین موتور پیستونداری، نوعی نقص مرتبط با این ساختمان است. تنها توربینهای بخار، با حذف کپسولیزم متناوب می‌توانند بدون اثر جدار باشند. و ماشین حرکت‌کننده با بخار را، حتی در دوران ماشینهای چهار انبساطی بسیار تکمیل شده، فراتر از حد گمان متحول سازند.

ماشین وولف: درباره ماشین وولف چند کلمه‌ای گفته شد، اما در اینجا درباره موفقیت روزافزون آن در فرانسه صحبت می‌کنیم (شکل ۳۴). در انگلستان، که این ماشین رواج کمتری داشت غالباً از روش به اصطلاح مک ناتینگ از نام مخترع آن مک ناتن<sup>۱</sup> استفاده می‌شد. در این روش با افزودن یک سیلندر فشار قوی به ماشین وات، معمولاً در نقطه مقابل شاهنگ، آن را مناسب کار خود می‌کردند.

ماشینهای مرکب: پیستونها، چه مانند ماشین وولف یا مثل ماشین مک ناتینگ مقابل هم کار کنند، از نظر کار ماشین اهمیتی ندارد زیرا نقاط مرگ در هر دو مورد مطابق یکدیگرند. اما در ماشینهای به اصطلاح مرکب، که هنوز تاریخ آنها را بررسی نکرده‌ایم، این همزمانی حرکت پیستونها

1. Mc Naughton



دیگر وجود ندارد. دو لنگ این ماشینها با یکدیگر معمولاً زاویه  $90^\circ$  درجه دارند تا بهترین یکنواختی در کار موتور و نیز تسهیلاتی برای شروع حرکت در این یا آن جهت تأمین شده باشد. در نتیجه این مکانیسم ورود بخار به سیلندر بزرگ در بخشی از مدت زمان خروج آن از سیلندر کوچک بسته می ماند و این حالت مستلزم وجود یک منبع واسطه بین دو سیلندر است. این ویژگیهای کاری مهم هستند و تمایز آشکار ماشین وولف از ماشین مرکب می باشند.

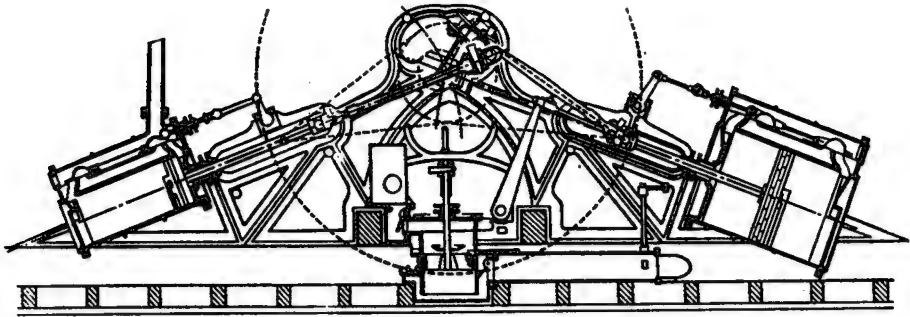
انبساط دوگانه در ماشینهای کشتی: همان طور که به استحضار رسانیدیم، حدود تاریخ اختراع ماشینهای بخار کشتی بود که لازم آمد برای کمک به کار ماشین به فکر انبساط چندگانه آن باشند. پس از یک دوره بسیار طولانی تحقیق و بررسی، حدود سال  $1870$  بود که ماشین مرکب در کشتیها رواج یافت. از آن پس کاربرد آن به ماشینهای ثابت و لوکوموتیوها نیز سرایت کرد، با این حال، در پایان این تحول موتور کشتی دارای سه یا حتی چهار انبساط شد.

پیشاهنگی به نام گ. م. رونتگن: ماشین آقای گارد موریس رونتگن هلندی که شایسته نیست وی را با کاشف اشعه ایکس اشتباه کرد، در خور توجه بسیار ویژه ای است. برای اینکه از اهمیت این ماشین برآوردی داشته باشیم باید بگوییم که طی بیست سال پس از  $1829$  آقای رونتگن تعداد  $30$  تا  $35$  ماشین بخار دو انبساطی کشتی ساخت که همگی بخوبی کار کردند.

رونتگن از سال  $1823$  با آقای جان کارکیل به تشکیل یک شرکت هلندی کشتیرانی با ماشین بخار دست زد. کارگاههای آنان در ناحیه فینورد<sup>۱</sup> کنار رودخانه موز در بالا دست روتردام تأسیس شد. در سال  $1834$  بود که رونتگن توانست امتیاز مربوط به آرایش  $90^\circ$  درجه ای لنگ و منبع واسطه را به دست آورد.

ماشینهایی که زیر نظر رونتگن ساخته شدند تقریباً همه مشخصات مشابهی داشتند. در آن زمان کشتیهای چرخدار متداول بودند و به همین دلیل سیلندرها در جهت طول بدنه کشتی قرار داده می شدند (شکل  $35$ ). نسبت حجمی این کشتیها  $3/5$  یا استثنائاً  $4$  بود. فشار معمولی گویا  $5$  اتمسفر بود. دیگهای بخار آنها از نوع استوانه ای با کوره درونی یا از نوع دیگهای بخار لوکوموتیوها بود. نتیجه کاربرد آنها نشانه کیفیت خوب آنهاست. تعدادی از ماشینهای رونتگن در سال  $1874$  هنوز کار می کردند.

دوره نوآوری: دهه  $1860 - 1870$  دوره ای است که طی آن ماشینهای بخار دو انبساطی به طور قطعی در کشتیها رواج یافتند. آقای آتاتول ماله چنین می نویسد: «حدود سال  $1860$ ، تقریباً همه راه حل های مربوط به کاربرد انبساط دوگانه در ماشینهای بخار کشتی پیشنهاد و حتی بعضی از



شکل ۳۵. ماشین رونتگن با انبساط دوگانه، ساخت ۱۸۳۷، برای کشتی چرخ دار  
برش طولی بدنه کشتی. محور زیرین، کندانسور، تلمبه هوا.  
نقاط مرگ دو سیلندر، مطابق نیستند.

آنها هم در مقیاس کم و بیش مهمی به کار گرفته شده بودند. چیز مهمی برای اختراع نمانده بود، تنها می بایست از میان این راه حلها یکی را برگزید و کاربرد آن را عمومیت داد.

این کار در این دهه انجام پذیرفت، زیرا افزایش قدرت موتورهای نیاز به داشتن ماشینهای با صرفه را الزام آورده بود. اما این ضرورت بیشتر در مورد کشتیهای بخاری دریا و اقیانوس پیما حس می شد. در واقع «در زمین، صرفه جویی مربوط به مصرف سوخت تقریباً منجر به کاهش نهایی زغال سوختی شده بود، اما در دریا این صرفه جویی به نتایج بسیار مهمتری انجامید». چند رقم می توانند برآورد نسبتاً دقیقی از مزایای کاربرد موتورهای با صرفه در کشتیها را به دست دهند. اهمیت اقتصادی انبساط دوگانه در کشتیها: برای نمونه یک کشتی اقیانوس پیمای پروانه دار متداول در سال ۱۸۶۵، نظیر کشتی *péreire* را بررسی می کنیم. این کشتی که بوسیله نیر در گلاسکو ساخته شده بود و به شرکت اقیانوس پیمایی تعلق داشت؛ ۵۰۰۰ تن ظرفیت آن بود و طی هشت روز یا ۱۹۲ ساعت مسافت ۲۵۰۰ میل دریایی را با سرعت ۱۳ گره می پیمود.

این کشتی مجهز به یک ماشین بخار با فشار متوسط و انبساط یگانه بود که ۳۵۰۰ اسب قدرت داشت که برای هر اسب ۲۵۰ کیلوگرم یعنی مجموعاً ۸۷۵ تن، وزن داشت. این ماشین «هر ساعت برای هر اسب ۱/۶ کیلوگرم می سوزانید که برای همه مسیر ۱۰۷۵ تن می شد. وزن کل موتور و سوخت ۱۹۵۰ تن بود که تقریباً ۴۰٪ ظرفیت آن می شد.

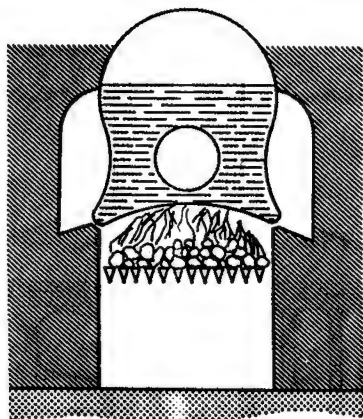
حال ببینیم که در صورت نصب ماشین با همان قدرت اما دارای فشار بیشتر و انبساط دوگانه

که لزوماً همان طور که خواهیم دید دارای کندانسور در سطح است -، چه تغییراتی پدید می آید. سرعت و در نتیجه مدت مسیر طی شده تغییری نمی کنند، چون قدرت آن ثابت مانده است. اما ماشین مرکب، تنها برای هر اسب در هر ساعت یک کیلوگرم می سوزاند. وزن آن برای هر اسب بیش از ۲۲۵ کیلوگرم نیست زیرا وزن دیگهای بخار متناسب با مصرف سوخت کاهش می یابد. بدین ترتیب، وزن ماشین، ۷۸۸ تن و سوخت آن ۶۷۲ تن است که کل آن از ۱۹۵۰ تن به ۱۴۶۰ تن تقلیل یافته است، یعنی ۴۹۰ تن کم شده است که حدود ۱۰٪ ظرفیت آن می باشد. بر روی یک کشتی بازرگانی از این نوع با ماشین قدیمی که مربوط به کارکنان کشتی، مسافران و وزن مفید است بیش از حدود ۲۰٪ ظرفیت یعنی حدود هزار تن نیست؛ اما با ماشین جدید، این وزن مفید به حدود ۱۵۰۰ تن یعنی ۳۰٪ ظرفیت می رسد، به عبارت دیگر به وزن مفید ۵۰٪ افزوده شده است.

به جای کوشش برای اضافه کردن به وزن مفید، می توانستند برای افزایش قدرت کشتی کار کنند و، بنابراین، روی سرعت آن (عامل اخیر تقریباً به نسبت کعب قدرت افزایش می یابد). با نصب یک ماشین مرکب ۵۰۰۰ اسبی که برای هر اسب ۲۲۵ kg وزن دارد این دفعه، وزن ماشین ۱۱۲۵ تن است. می توان این وزن را پذیرفت، زیرا کافی است تا ۸۵۰ تن زغال بار بزنیم که بر روی هم ۱۹۷۵ تن وزن کشتی می شود. در واقع ۸۵۰ تن کافی است زیرا در یکسو ما برای هر اسب در ساعت بیش از یک کیلوگرم نمی سوزانیم و از سوی دیگر سرعت ما به ۱۴/۷ گره دریایی رسیده است و مسیر ما لا اقل ۲۲ ساعت، تقریباً یک شبانه روز طول کشیده است. صرفه جویی در سوخت نسبت به ماشین نخست، هنوز ۲۲۵ تن است.

کاربرد در انگلستان: نخست به جریان وقایع در انگلستان نظر افکنیم. نخستین کاربرد در سال ۱۸۵۴ بود، یعنی ۱۷ سال پیش از آنکه نیروی دریایی انگلستان تصمیم به کاربرد ماشینهای دو انبساطی در همه کشتیهای بخاری دریایما گرفت (۱۸۷۱).

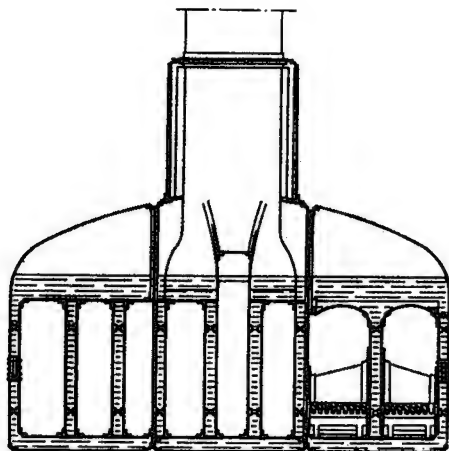
ابتکار این اقدام را آقایان راندولف والدرا<sup>۱</sup> ماشین سازان شهر گلاسکو و به شکلی خصوصیت، آقای جان الدر مدیر این مؤسسه داشت، اما در سال ۱۸۶۹ پیش از آنکه موفق شود، مفقود گشت، نخستین کاربرد در سال ۱۸۵۴ مربوط به یک کشتی پروانه دار تجاری به نام برندون<sup>۲</sup> بود. مصرف این کشتی برای هر اسب در ساعت از دو کیلوگرم به ۱/۵ کیلوگرم تقلیل یافت. از سال ۱۸۵۴ تا ۱۸۵۸ آقای راندولف والدر ۱۱۱ ماشین دو انبساطی با قدرت جمعی ۸۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ اسب برای کشتیها ساختند.



شکل ۵۱. دیگ وات با گریه روی داخلی.

همین‌که مسأله فشارهای بالاتر پیشنهاد شد بدون هیچ پافشاری از میدان خارج شدند. دیگهای کم فشار کشتی: شکی نیست که کاربرد دیگهای بخار کشتی با افزایش روزافزون فشار در آنها مستلزم اصلاحات بنیادی در ساختمان آنها بود. این وضع دقیقاً در نقطه مقابل دیگهای لوکوموتیو بود که امکان بالا بردن فشار از  $3/5$  به  $15$  و حتی  $16$  کیلوگرم بر سانتیمترمربع در آنها هیچ‌گونه الزامی در تغییر بنیادی ساختار آنها ایجاد نمی‌کرد. در یک کشتی بخاری، جا، مانند لوکوموتیو خیلی تنگ و محدود نیست و برای تحول امکان هست. با این‌همه، در کشتی، گرایش زیادی به کاستن وزن و حجم ماشینهای حرکت‌دهنده دیده می‌شود زیرا هر کاهشی با افزایش متناسب بار کشتی همراه است. در مورد دیگهای بخار، ما از دیگهای کم فشار سنگین و حجیم شروع کرده‌ایم و به دیگهایی رسیدیم که روزه‌به‌روز کوچکتر و سبکتر می‌شدند. این وضع از راه کاهش وزن آب محتوی دیگ است که دستاوردی بسیار بزرگتر از افزایش وزن فلز مقاومتر مورد نیاز خواهد بود.

دیگهای قدیمی‌ترین کشتیهای بخاری خیلی کم توصیف شده‌اند. مثلاً دقیقاً معلوم نیست که دیگ بخار کشتی کلرمون، نخستین کشتی بخاری فولتن چگونه بوده است. با این‌حال، در سال ۱۸۱۷ روشن شد که شکل مورد نظر، دیگ مکعب مستطیلی «وات» است که در نوعی که در بالا از آن سخن راندیم یک گریه‌رو فلزی داخلی دارد. آقای آنتول ماله می‌نویسد: «دیری نباید که گریه‌روهای چهارگوش در دیگهای بخار با جدارهای موازی رواج کامل یافتند ... نوع دیگ



شکل ۵۲. دیگ بخار محفظه‌ای کشتی.

گره‌روداری که در سال ۱۸۲۰ به طور قطعی مورد قبول قرار گرفت صندوقی به شکل متوازی‌السطوح با سقف گوز بود که کوره‌هایی داشت که به گره‌روهایی با مقطع چهارگوش راه داشتند. این گره‌روها روی آنها خم می‌شدند و به دودکش وصل می‌شدند. از جمله این نوع دیگها، می‌توان از دیگ بخار بولتون و وات نام برد که بعداً همه سازندگان دیگ بخار از آن تقلید کردند. مدت بیست سال دیگهای بخار کشتی همگی یا تقریباً همگی بر همین اساس، اما با تغییرات جزئی بسیار، ساخته می‌شدند» (شکل ۵۲).

ماشینهای کم فشار از وزن زیاد بخار استفاده می‌کردند و بزودی واحدهای تبخیر پر قدرتی شدند. آنها برای رسیدن بدین قدرت، از چندین کوره گره‌رودار استفاده کردند، چندین ردیف گره‌رو روی هم قرار می‌گرفتند، به این گره‌روها شکل دوارهای طولی یا عرضی و یا حتی در جهت ارتفاع داده می‌شد. در کشتیهای بزرگ، چنین دیگ بخاری، دو یا سه کوره داشت. دیگهای بخار پهلوی یکدیگر ردیف می‌شدند و دیگ بخار محفظه‌ای نام داشتند. بعدها، دیگها را در دو ردیف چنان می‌گذاشتند که بتوانند پشت به پشت یکدیگر قرار گیرند و همگی یک دودکش داشته باشند؛ در این صورت نام «دورنما» به آنها داده می‌شد. برای افزایش باز هم بیشتر قدرت، به دودکشهای کشتی می‌افزودند. برای نمونه، دیگهای کشتی گریت بریتن را که آقای برونل در سال ۱۸۴۲ ساخته بود بررسی می‌کنیم. قرار بود که مقدار بخار لازم برای ماشینی که ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ اسب قدرت و ۵/۰ کیلوگرم

فشار داشته باشد تأمین شود. دو نما تهیه شد که هر کدام سه محفظه داشت که از کف به یکدیگر مربوط می شدند. هر محفظه دارای سه کوره، با پنجره‌ای حدود یک متر مربع بود که جمعاً حدود ۲۴ متر می شد. این مجموعه مسافتی در زمین برابر ۱۰ متر از هر طرف را اشغال می کرد و ۶/۲ متر ارتفاع داشت. وزن فلز دیگها ۲۰۰ تن و مقدار آب آنها نیز ۲۰۰ تن بود. باید تذکر داد که برای چنین فشار کم ۰/۵ کیلوگرمی، جدارهای صاف دیگ می بایست با میله‌های آهنی و آرماتوربندی مهمی تقویت می شدند. حال نسبتها و بازده دیگها را بررسی کنیم. مصرف معمولی سوخت در آن زمان عبارت بود از سه کیلوگرم زغال و بیست کیلوگرم بخار برای هر اسب اسمی، نسبتهای قابل قبول برای سازندگان آن نشان می دهند که این نوع دیگ بخار، حدود ۳۰ کیلوگرم در هر مترمربع سطح گرم کننده در هر ساعت تبخیر می کرد و آتشدان می توانست برای هر مترمربع در هر ساعت ۵۰ کیلوگرم زغال را بپذیرد. حدود یک مترمکعب بخار ساز برای ۳۰ اسب نیرو لازم بود. وزن آن بر حسب اسب حدود ۲۵۰ کیلوگرم بود و در مجموع ۱۵۰ کیلوگرم وزن فلز و ۱۰۰ کیلوگرم وزن آب بود که بر حسب میزان قدرت دستگاه تغییراتی داشت.

این دیگهای غول آسا بسیار عالی بودند: مدت زیادی کار می کردند، نگهداری زیادی لازم نداشتند و تقریباً هیچ نشستی بخار در آنها دیده نمی شد. تمیزکاری آنها ساده و از راه دریچه ها انجام می گرفت. چون دمای آنها معتدل بود جرم آب در آنها نه زیاد و نه چسبیده بود. گردش آب بسرعت و به طور کامل انجام می گرفت. با آب دریا کار می کرد و برای اینکه مقدار نمک آن از اندازه قابل قبول تجاوز نکند منظمأ نمک را تا حدودی از آب می گرفتند.

در وضع کشتیرانی آن روزگار، این طرز کار بسیار استثنایی بود و باید مکانیسم آن شرح داده شود. آب دریا حاوی معادل ۳/۵٪ وزن خود املاح محلول است که از آن میان ۲/۶۵٪ آن کلورسديم و ۰/۸۵٪ سولفاتها (بویژه سولفاتهای کلسیم و منیزیم) است. ماشینهای کم فشار برای هر اسب در هر ساعت به اندازه ۲۰ کیلوگرم بخار مصرف می کردند و این مقدار، ۷۲۴/۵ گرم نمک دارد که ۱۷/۳۸۰ کیلوگرم بر ژول است. یک کشتی فرقت فرانسوی در سال ۱۸۴۲ برابر ۴۵۰ اسب قدرت داشت. قدرت واقعی ۹۰۰ اسب اسمی (با نشانگر وات اندازه گیری شده) بود. این رقم به معنای ۱۵۶۴۲ کیلوگرم نمک در روز یا حدود ۱۶ تن است. این ارقام به ما می گویند که یک دیگ بخار کشتی که از آب دریا استفاده می کند اگر دخالتي در آن نکنند پس از چند ساعت از کار باز می ماند. بنابراین جدا از آبرسانی، باید در فواصل زمانی معینی، زمانی که میزان نمکها به ۱۰/۵٪ رسید، که سه برابر نرخ طبیعی است، نمکهای دیگ را برطرف ساخت. از این مطلب نتیجه گرفته

می‌شود که برای هر لیتر آب تبخیر شده باید  $0.5^\circ$  لیتر را خالی و در نتیجه  $1.5$  لیتر آب وارد کرد. چنانچه آب در دمای  $110^\circ\text{C}$  تبخیر شود و دمای ورود آن به دیگ  $40^\circ\text{C}$  باشد (آبی که در کندانسور است)، اتلاف گرما در نتیجه استخراج آب، تنها  $5.5\%$  است که بسادگی می‌تواند با گرم کردن دوباره آب وارد به دیگ جبران شود.

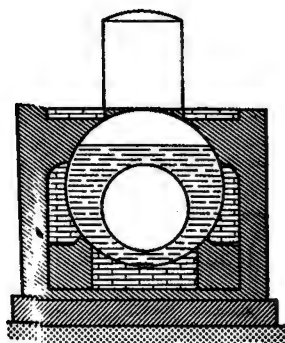
بدین ترتیب، دیده می‌شود که دیگهای محفظه‌ای چگونه توانستند مدت سی سال رضایت کامل دارندگان خود را داشته باشند. آخرین مجموعه‌های مهم آنها در سالهای  $1850$  و  $1854$  برای شرکت کیونارد و رویال میل برای حرکت دادن آن عده از کشتیهای باری ساخته شدند که قدرتشان به  $800$  اسب می‌رسید. فشار بخار از این پس به یک کیلوگرم بالا رفت که با این سیستم امکان‌پذیر نبود. در آن زمان سیستم تقویت دیگ (نبشیه، میله‌های تقویتی، قیدها) وزن معینی داشتند. دیگهای محفظه‌ای مانند دیگهای تابوتی، که منشأ آنها بودند، در برابر انواع تازه دیگهای پرفشار، بدون هیچ مقاومتی کنار رفتند.

### دیگهای با فشار متوسط

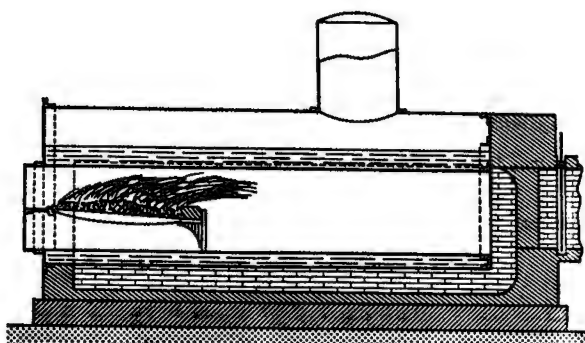
دیگهای استوانه‌ای: ما تا اینجا سه نوع دیگ بخار استوانه‌ای شکل را که تا پایان ماشینهای پیستوندار به عنوان دیگ بخار زمینی کلاسیک باقی ماندند بررسی کردیم. اینها عبارتند از: دیگ بخار کورنوال که کوره داخلی دارد؛ دیگ بخار لنکشر که دو کوره داخلی موازی دارد. این دو نوع دیگ در جهان آنگلوساکسون و آلمان کاربرد داشتند. سومین نوع، دیگ بخار با کوره خارجی و دارای لوله‌های آب است که تقریباً منحصرأ در فرانسه و مستعمرات آن به کار می‌رفتند. این سه نوع دیگ در نیمه نخست سده نوزدهم برای تولید بخاری که فشار آن در آن زمان بالا و در اواخر همان سده بسیار معتدل خوانده می‌شد، یعنی  $2$  تا  $5$  و به طور کلی  $3$  اتمسفر، مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

در سالهای نخستین سده نوزدهم، زمانی که ترویشیک و اونز به ساختن ماشین با «فشار بالا» در اصطلاح آن زمان، یعنی بیشتر از فشار اتمسفر همت گماشتند لازم آمد که گام بلندی جلوتر از دیگ بخار تابوتی، که تنها دیگ رایج زمان بود، برداشته شود. این دو نفر تقریباً به طور غریزی بدین فکر افتادند که تنها شکل مناسب دیگ، استوانه‌ای یا کره‌ای است.

دیگ بخار ترویشیک را می‌توان ساخته سال  $1803$  یا  $1804$  دانست. بدنه استوانه‌ای آن که نخست چدنی بود از جلو با صفحه‌ای که به ورق آهن پیچ شده بود، لوله‌ای به شکل «U» را که



شکل ۵۴. دیگ کورنوال. مقطع عرضی.



شکل ۵۳. دیگ کورنوال. مقطع طولی

کوره در آن جا داشت، به صورت پرچ شده با خود نگه می داشت. یکی از مزایای این نوع دیگ، سهولت سوار کردن آن بود.

آقای اونز در سال ۱۸۰۵ شکل استوانه‌ای را برگزید. حداکثر ابعاد مورد نظر ۱ و ۳ پا قطر و ۲۰ تا ۳۰ پا طول بود، تا استحکام کافی داشته باشد. این شکل مربوط به دو لوله متحدالمرکز است که لوله وسطی، کوره ماشین بود. گازها از راه گریه‌رو پایینی برمی گشتند. دستگاه با پرچ کردن ورقهای آهن ساخته شده بود.

آقای اونز در همان تاریخ یک دیگ بخار استوانه‌ای با ته برآمده و کروی را شرح می دهد که مثل دیگ وات از بیرون گرم می شود. این نوع دیگها در نیمه نخست این سده، بدون رواج زیاد، در کار بودند (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۹۸، شکل ۴۷).

در باره دیگ دیگر اونز باید گفت که شکل آن درست شبیه دیگ کورنوال بود (شکلهای ۵۳ و ۵۴). درباره وجود اولیه خاستگاه این دیگ، اطلاعات زیادی در دست نیست. تنها معلوم است که در سال ۱۸۱۲ وجود داشته است. بنابه گزارش یک کارگر ترویشیک، چنین دیگی در این سال در دالکوث<sup>۱</sup> به جای یک دیگ وات نصب شده است. ابعاد آن چنین بود: طول، کمی بیش از ۹ متر؛ قطر، کمی بیش از ۱/۸ متر؛ قطر کوره، کمی بیش از ۱/۵؛ فضای بین بدنه دیگ و پایین کوره، کمی بیش از ۱۵ سانتیمتر. دیگ دیگری شبیه آن در همان سال بوسیله ترویشیک ساخته شد و در ناحیه ترویتن<sup>۲</sup> در کورنوال کار گذاشته شد. این دیگ را می توان در ساینس میوزیم لندن دید.

اصراری نداریم که از سرنوشت دیگهای کورنوال، که بدون اصلاحات محسوسی، حدود یک

1. Dalcoath    2. Trewithen



سده کار می‌کردند اطلاعاتی به دست آوریم. بازده حرارتی این دیگها بسیار عالی بود اما سطح گرماده آنها نسبت به حجم دیگ زیاد نبود این دیگها نیز رفته رفته جای خود را در کارخانه‌ها به دیگهای دوکوره‌ای سپردند و دیگ بخار کورنوال عملاً در تلمبه‌خانه‌ها منزوی شد و در آنجا، دستگاههایی با همان نام را تغذیه می‌کرد. معلوم است که عمر این تأسیسات گاهی به یک سده رسیده است - و نیز برای بعضی صنایع جهت ایجاد گرما، بخار تأمین می‌کرد. بعضی از دیگهایی که برای این کار مورد استفاده قرار گرفتند تا زمان بین دو جنگ جهانی هم فعال باقی ماندند.

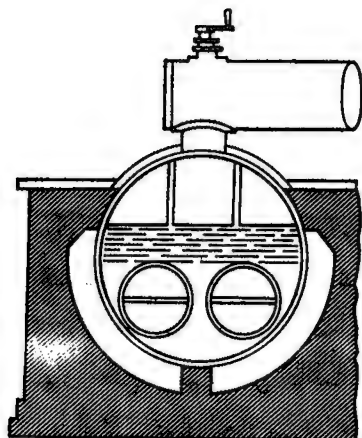
افزایش سطح تشعشع، هر جا که مورد نظر بود با نصب دو کوره پهلوی پهلوی در بدنه دیگ، حاصل می‌شد. دیگ لنکشر چنین وضعی داشت (شکلهای ۵۵ و ۵۶). این دیگ در سال ۱۸۴۴ بوسیله ویلیام فیربن و جان هذرینگتن<sup>۱</sup> از منچستر به ثبت رسید. فیربن بعدها می‌گفت که در استفاده از دو کوره به هیچ وجه افزایش سطح تشعشع را در نظر نداشت، بلکه قصد وی، برعکس، متناوب کردن گرما در دو کوره برای جلوگیری از دوده بود. اما او فوراً متوجه شد که سیستم وی چه مزیت واقعی دارد. به هر تقدیر، این دیگ بیشترین اقبال را در انگلستان، جهان انگلوساکسون و در آلمان داشته است. کاربرد این دیگ بین دو جنگ جهانی، هنوز در کارخانه‌هایی که از ماشین بخار استفاده می‌کردند عمومی بود؛ اما این سیستم هرگز در فرانسه نفوذی نیافت، یا لااقل کاربرد آن بسیار کم بود.

آقای دیکینسون با طرح جدول جالبی با آوردن اندازه‌های تشعشع، مقایسه‌ای بین فضاگیری و گنجایش انواع دیگها می‌کند. تبدیل واحدها به یکدیگر بیهوده می‌نماید زیرا استفاده‌ای که از این ارقام می‌شود مقایسه آنها با یکدیگر است.

چنانچه سطح تشعشعی برابر ۵۰۰ پای مربع مورد نظر باشد با دیگ بخار نیوکامن، گنجایش دیگ باید ۱۰۰۵ پای مکعب باشد و فضاگیری ۱۰۰۰۰ پای مکعب است. با دیگ بخار لنکشر گنجایش دیگ به ۴۰۴ پای مکعب کاهش می‌یابد و فضاگیری به ۲۷۰۰ پای مکعب. خود این ارقام گویا هستند.

دیگ بخار لنکشر: دیگ بخار لنکشر به علت کاربرد دیرپای و میل به افزایش فشار که در همان زمان ایجاد شده بود، دستخوش تحول فنی چشمگیری شد و آقای دیکینسون جزئیات آن را بررسی کرده است. ما فکر می‌کنیم که خوب است به دنبال وی این نوع تحول بدون تغییر شکل را بررسی کنیم. در اثر این تحول، دستگاهی در مقابل ما قد علم کرد که خصوصیات آن عمیقاً تغییر کرده بود. تاریخ‌نویسان نسبت به این تحولات در مقایسه با حوادث پرسروصدا، به چشم تحقیر می‌نگرند؛

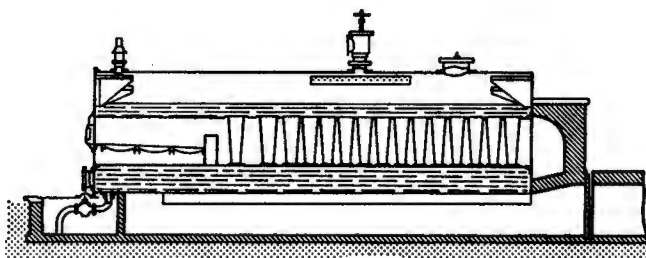
1. Hetherington



شکل ۵۵. دیگ لنکشر، نوع اولیه فیربرن - هذرینگتن (۱۸۴۴).

گرچه این حوادث هم همیشه مهم نیستند.

پیش از هرچیز باید از تغییراتی در مهارت کارگر سخن راند. در سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ می‌توان گفت که سازندگان دیگ بخار، دیگر آن را وسیله‌ای برای اینکه مهندس مکانیک شوند نمی‌دانستند. لوله‌های داخلی، که استوانه‌های درازی بودند، در معرض شکستن بودند. خود آقای فیربرن در این باره آزمایشهایی کرد و در نقاطی از آن حلقه‌هایی برای تقویت گذاشت. بعدها برای جلوگیری از آن، سیستم جالبی را یافتند. در سالهای ۱۸۵۱ - ۱۸۸۵ انواع اتصالات برای تقویت استوانه‌ها



شکل ۵۶. دیگ لنکشر، نوع ۱۸۷۳ با لوله‌های گالویی.

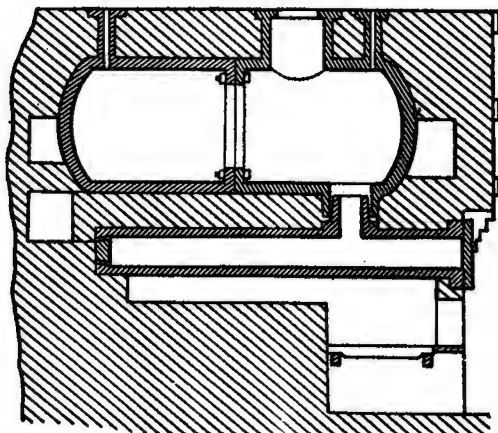
ساخته شد. وسیله بسیار رایج دیگر، لوله گالووی بود که آن هم در سال ۱۸۵۱ ساخته شد. این دستگاه شامل لوله‌هایی عمودی پر از آب بودند که از میان لوله‌های کوره می‌گذشتند. این لوله‌ها که نقش تقویت‌کننده داشتند سطح تشعشع را افزایش می‌دادند و جریان آب را سریع می‌کردند. کوره‌های موجدار، طرح آقای سمسون فوکس<sup>۱</sup> در سال ۱۸۷۶ خصوصیت مهمی داشت. در ابتدا برای ساخت آن ناچار از روش چکشکاری استفاده می‌شد. سپس در سال ۱۸۷۸ آقای شولتسه<sup>۲</sup> و کناوت<sup>۳</sup> استفاده‌کنندگان آلمانی این امتیاز، ماشین ابزار خاصی برای تولید آن ساختند. کوره‌های موجدار در کشتیها برای دیگهای بخاری که بعدها شرح داده خواهند شد بسیار رواج یافت. نخست کف دیگ را وسیله یک نبشی به بدنه محکم می‌کردند. از سال ۱۸۵۶ برای افزایش مقاومت دیگ در فشار حدود هشت اتمسفر، آقای ادمسون<sup>۴</sup> قطعات بدنه دیگ را با ماهیچه‌های طولی و بدنه را با ته دیگ با بستهای آهنی، به هم متصل ساخت. باید گفت که نوع کف صاف با لبه‌های برگشته به بالا، که به توسط نبشی اتصال ایجاد می‌شد حدود سال ۱۸۶۶ اختراع شد. در مرحله آخر دیگهایی متداول شد که آنها هم محدب و هم با لبه‌های برگشته بود، که استفاده از ماهیچه‌ها و بست و نبشی را منتفی ساخت. این کار را آقای تامسن در سال ۱۹۰۵ رایج کرد.

موضوعی که ناگفته مانده است مربوط به مصالح ساخت دیگ بخار می‌باشد. ورق فولادی در انگلستان در سال ۱۸۶۵ برای این کار مورد استفاده قرار گرفت. در این زمان چند سالی از اختراع روشهای نوین تولید فولاد گذشته بود؛ عدم اعتماد نسبت بدان قابل فهم است. شکی نیست که برای باور کردن بدان، گذشت زمان لازم بود.

از نظر روش ساخت باید گفت که قدیمترین طرز تولید دیگ بخار این بود که با تکه‌کاری در بدنه دیگ سوراخهایی به وجود می‌آوردند و با دست، ضمام را بدان پرچ می‌کردند. در سالهای ۱۸۷۰ بود که ایجاد این سوراخها با مته‌کاری و پرچ کردن نیز با ماشین انجام شد.

علت ماندگاری زیاد دیگ لنکشر این بود که به فشارهای بسیار بالا نیاز شدیدی احساس نمی‌شد و می‌توانستند به شرایط موجود، که همان‌طور که در بالا توضیح دادیم پیوسته رو به کمال می‌رفت، خشنود باشند. بعداً فشارها آن اندازه بالا رفتند که از حدود دیگ لنکشر گذشتند، اما این وضع نیاز به فشارهای متوسط را از بین نبرد و این امر سبب شد که این نوع دیگ تا پایان عمر ماشینهای پیستوندار به‌کار خود ادامه دهد.

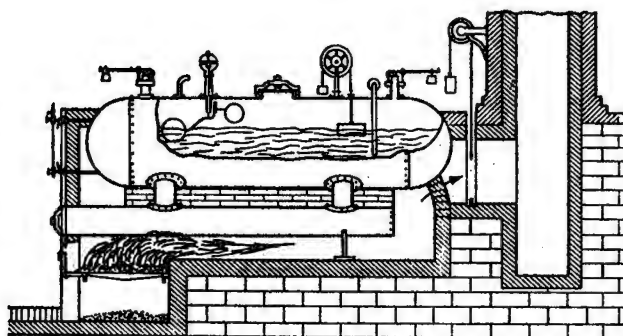
دیگ بخار لوله آبی (یا فرانسوی): جز بررسی خاستگاه دیگهای بخار لوله آبی، نوع متداول در فرانسه که همان اندازه در این کشور پابرجا ماند که دیگ لنکشر در کشورهای انگلوساکسون، موضوع



شکل ۵۷. دیگ بخار لوله آبی (فرانسوی)؛ مدل ادواردز، حدود ۱۸۱۵، چدنی.

دیگری از این مبحث نامانده است. این نوع دیگ بخار با بدنه استوانه‌ای و کوره خارجی در رایجترین شکل خود دارای دو لوله آبی طویل در زیر بدنه خود بود.

آقای وولف در نخستین سالهای این سده نوعی دیگ بخار پرفشار را به نمایش گذاشت این دیگ برای بخار دادن به ماشین با انبساط دوگانه ساخته شده بود و شامل یک بدنه استوانه‌ای و چند لوله افقی آب بود. این لوله‌ها که در عرض گذاشته می‌شدند حدود یک دوجین بودند. این نمونه در بریتانیا موفقیتی نداشت اما آقای ادواردز در سال ۱۸۱۵ همراه ماشین وولف آن را به فرانسه آورد. تبلیغ این دیگ بزودی همه‌جا پراکنده شد (شکل ۵۷). آقای ادواردز در برهه پنج سال، مدل آن را کاملاً تغییر شکل داد: لوله‌های آب را در طول کار گذاشت و تعداد آنها بتدریج به دو لوله کاهش یافت اما قطر آنها به‌طور کاملاً چشمگیری بزرگ شد. این دیگ در آن زمان دیگ لوله‌دار کلاسیکی در فرانسه شد که آقای کریستین مدیر کنسرواتوار پیشه و هنر فرانسه در رساله مکانیک خود که در سالهای ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۵ انتشار می‌یافت آن را توصیف کرده است. این دیگ در کتابهای فنی فرانسه تا اوایل سده بیستم همه‌جا دیده می‌شود (شکل ۵۸). انگلیسیها چندتایی از این دیگ را به‌کار گرفته‌اند و آن را دیگ فرانسوی یا «فیل دیگ» می‌نامیدند که با شکل آن بخوبی جور بود. اضافه کنیم که در فرانسه دیگ به اصطلاح نیم لوله آبی - دیگ لوله آبی که بدنه استوانه‌ای آن را دیگی با لوله‌های دودی تشکیل می‌دادند - رواج زیاد داشت و ما در آینده به بررسی آن می‌پردازیم.



شکل ۵۸. دیگ بخار لوله آبی (فرانسوی)؛ مدل کلاسیک، اواسط سده نوزدهم، از آهن ورق.

دیگ بخار لوله دودی برای لوکوموتیوها و برای کشتیها: ما یکبار دیگر به گفتار آناتول ماله باز می‌گردیم: «طبق طرحهایی که معمولاً درباره دیگهای لوله دودی انتشار یافته است، تاریخ پیدایش این دیگ می‌بایست با اختراع سال ۱۸۲۸ مارک سگن شروع شده باشد. اما ما گمان داریم که تاریخ پیدایش این دیگ زودتر از این باشد؛ زیرا چنانچه آقای سگن مطابق همه شواهد، نخستین کسی باشد که دیگ بخاری از این مدل ساخته است طرح آن پیش از وی وجود داشته است. ابداع تقسیم کردن یک گر به رو با مقطع انحنایی به تعداد زیادی لوله‌های کوچک - بدین منظور که طبق یک اصل بسیار مشهور هندسی، سطح تشعشع به مقیاس زیاد بالا رود - آنچنان طبیعی است که حقاً نمی‌توان باور داشت که تا سال ۱۸۲۸، که نیاز شدید به داشتن یک دیگ بسیار قوی احساس شد، کسی به این فکر نیفتاده باشد. ما خواهیم دید که این طور نیست و مخترعان متعددی در آن زمان این فکر را داشته‌اند.»

ما هم بنوبه خود به گفته بالا، نوشته‌ای از ژاک کنستانتن پریه را می‌افزاییم که بسیار قدیمتر از سگن بود زیرا به سال ۱۷۷۳ برمی‌گردد: «... تولید بخار زیاد با آتش کم را می‌توان با ساخت دیگی به دست آورد که مساحت زیادتری را در معرض آتش قرار دهد و برای این کار اجازه دهد که آتش از بین توده آب که در آن هست از راه لوله‌های زیادی که به عنوان دودکش کوره عمل می‌کنند بگذرد.»

بدون اینکه بخواهیم باز هم دورتر برویم، در سال ۱۷۹۳، اختراعی را که آقای جوئل بارلو، شاعر

و کنسول ممالک متحدۀ امریکا در فرانسه به ثبت رسانید، پیش‌روی داریم. بارلو بوضوح لوله‌های آبی و لوله‌های دودی را پیش‌بینی کرده است، گرچه کمی به اشتباه، وی لوله‌های آبی را به شکل دسته‌ای توصیه می‌کرد و تنها به یک لوله دودی ماریپیچی می‌اندیشید، طرحی که مسأله کشش را تقریباً حل ناشدنی می‌کرد؛ عاملی که در دیگهای لوله‌ای دودی اهمیت بسیار دارد.

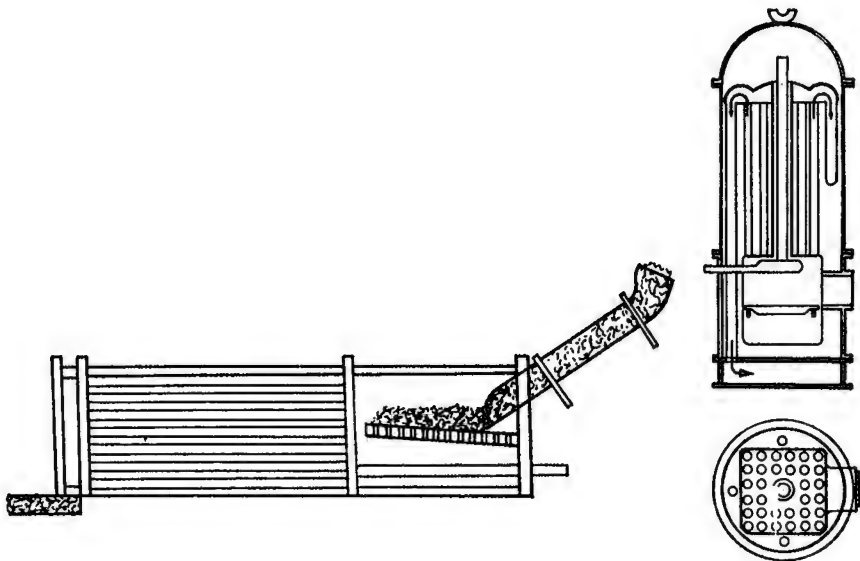
بارلو را نمی‌توان به هیچ‌وجه تکنسین دانست، اما روشن است که وی میزبان آقای فولتن در پاریس بود و این آقای فولتن نخستین کسی است که دیگ بارلو را روی کشتی بخاری او سوار کرد. برپایه دلایل بالا می‌توان پرسید که آیا بارلو به‌طور ساده نام مستعار فولتن نبوده است. ماله در این باره بررسیهایی کرد اما چیزی دستگیرش نشد.

در سال ۱۸۲۱ آقای فیلیپ ژانامبر بازرس قبلی ضرابخانه که مدیر کارخانه اندره هم بود، اختراعی را درباره نوعی دیگ بخار عمودی دارای شش لوله به ثبت رسانید. پنج لوله کوچک آن از کوره آمده بودند و یک لوله بزرگ برای بازگشت بود. کوره آن داخلی بود و مجموعه کوره و لوله‌ها یک قطعه جداشدنی را تشکیل می‌دادند. این همان کوره‌ای است که پس از گذشت ۳۵ سال بوسیله آقایان پرینون با شرکت آقایان توماس و لورنس با موفقیت زیادی رواج یافت.

ما اینک به دوره ساخت ماشینها نزدیک می‌شویم. واقعه مهم این زمان اختراعی است که آقای جیمز نویل<sup>۱</sup> انگلیسی در سال ۱۸۲۶ به ثبت رسانید. توضیح سیستم وی در سال ۱۸۲۸ در مجله *Newton's Journal* انتشار یافت (شکل ۵۹). در فرانسه در همان زمان باید از کارهای (کمی مقدماتی) آقای لگری<sup>۲</sup> که سازنده ماشینهای پیشنهادی بود یاد کرد. در نوشته‌های وی «در توده درهم‌وبرهمی از طرحهای بی‌قاعده و تقریباً غیرعملی، گاهی اندیشه‌های ارزشمندی می‌درخشند». رساله وی با عنوان *Nouvelle mécanique du feu* به تاریخ ۱۸۲۷، محتوی کروکی دقیقی از یک دیگ بخار لوکوموتیو همراه با توضیحات بسیار روشن است. کوره این دیگ داخلی است (شکل ۶۰). این طرح به دیگ بخار کلاسیک لوکوموتیو بسیار نزدیکتر است تا دیگ سگن و حتی دیگ راکت.

با این دیگ به دوره‌ای گام می‌گذاریم که هر دو مرز آن، سگن و استیونسن برای لوکوموتیوها دیگ بخار لوله دودی ساخته‌اند. چگونه چنین اتفاقی افتاده است؟

در نیمه دوم سال ۱۸۲۷ سگن در اندیشه ساخت نوعی دیگ بخار لوله دودی، قبل از همه برای کشتیهای بخاری خود در رون بود. وی در ۱۳ دسامبر نخستین اختراع خود را به ثبت رسانید. آزمایشهای وی در دسامبر ۱۸۲۷ و ژوئیه ۱۸۲۸ انجام گرفتند. در ماه مه ۱۸۲۹ نخستین لوکوموتیو



شکل ۵۹. دیگ بخار لوله‌ای جیمز نویل.

شکل ۶۰. دیگ بخار لوله آبی لگری.

در حال ساخت بود. این لوکوموتیو در اول نوامبر برای نخستین بار مورد آزمایش قرار گرفت. در این بین، آقای سگن در ۱۶ اکتبر ۱۸۲۹ اختراع دوم خود را به ثبت رسانید - اختراعی که بویژه کاربرد دیگ بخار لوکوموتیوها و نیز استفاده از دَم را شامل می‌شد. اما چنین می‌نماید که برای اینکه این ماشینها واقعاً به‌کار گرفته شوند دو سال دیگر باید بگذرد (رجوع کنید به مجلد سوم، شکل ۹۹).

در باره جزئیات کارهای انگلیسیها روی این نوع ماشین اطلاع ما بسیار کم است. نتیجه مسابقات رینهیل در آوریل ۱۸۲۹ منتشر شد. آزمایشهای مقدماتی لوکوموتیو راکت در اول دسامبر آغاز شد و آزمایشهای واقعی در ۶ اکتبر. بدون شبهه آقای هنری بوث دبیر لیورپول - منچستر کاربرد دیگ بخار لوله دودی را به استیونسن القا کرده است. اما روشن نیست که خود وی این اندیشه را از کی گرفته بود. رویهمرفته، این موضوع اسمیت اهمیت چندانی ندارد زیرا همان‌طور که دیده می‌شود منابع اطلاعات ما در این باره روزافزون است.

در پایان این گفتار چیزی که ما می‌توانیم به داوری بسیار نافذ آقای آنا تول ماله، این عالم بزرگ بیفزاییم، این است که: سگن نخستین کس بود که بدین اندیشه راه یافت ولی تنها یک دیگ بخار لوله‌ای دودی ساخت؛ استیونسن دومین کس در این راه بود، اما وی یک دیگ بخار واقعی

لوکوموتیو ساخت.

با چند ملاحظه فنی این ادعا را ثابت می‌کنیم. در دیگ بخار سگن، کوره در خارج دیگ است و گازها نخست از یک گره‌رو خارجی می‌گذرند و از لوله‌ها فقط برای برگرداندن استفاده می‌شود. وانگهی سگن خود را تنها وقف این سیستم کرده بود، نه چیز پیشرفته‌تری. اما استیونسن، در دیگ بخار لوکوموتیو راکت وی، کوره مطمئناً در بیرون دیگ است، گازها مستقیماً از میان لوله‌های موازی می‌گذرند - کاری که پس از آن همیشه تکرار شده است. وانگهی در سال پس از ساخت پلانت، استیونسن کوره را در دیگ ادغام کرد، که مطمئناً دستاورد مهمی است (رجوع کنید به، مجلد سوم، صفحه ۴۹۸، شکل ۹۸).

همان‌طور که می‌بینید، مقایسه کارهای این دو مهندس، دشوار نیست. اضافه کنیم که تفاوتی که دیده می‌شوند و می‌توانند به ضرر سگن باشند ناشی از محیط نامطلوبی است که سگن در آن می‌زیست.

این را هم باید یادآور شد که دو نفر بدشانسی که در مسابقات رینهل دیگ بخار لوله‌ای دودی خود را بخوبی آماده کرده بودند، از یکسو آقایان جان بریثویت<sup>۱</sup> و ادیکستن بودند که لوکوموتیو ناولتی آنها پس از حادثه کوچکی که برای دستگاه آبرسانی آن روی داد، از دور مسابقه خارج شد؛ دیگ بخار آنان یک کوره کروی یک تکه داشت. از سوی دیگر آقای تیموتی هکورت هم به علت اینکه ماشینش بسیار سنگین بود از دور مسابقه کنار گذاشته شد، اما وی بعداً تعدادی لوکوموتیو برای راه‌آهن استاکتن به دارلینگتن ساخته است.

تحولات بعدی دیگ بخار لوکوموتیوها در جهت افزایش قدرت هر واحد با در نظر گرفتن محدودیت‌های الزامی از لحاظ جایگیری بود؛ زیرا عرض خط، هیچ تغییری نکرده بود. وانگهی فشار بخار دیگ نیز خیلی زیاد شد و ورق فولاد به جای ورق آهن به کار رفت. اما خارج از این عوامل، پس از دیگ بخار پلانت در ۱۸۳۰ تغییرات اساسی ایجاد نشد. در سراسر این دوران، استوانه‌های محتوی لوله‌های موازی دودی رایج بودند. یک سر استوانه به کوره محتوی لایه‌های آب و جدارهای تقویت‌شده دیگ که روکش آن به بدنه کوره مماس بود، راه داشت و سر دیگر به هود دیگ وصل بود و لوله‌ها در آن باز می‌شدند. همه این اصلاحات در جزئیات کار بودند و آنچه که در بحث راجع به دیگ لنکشر گفتیم برای اینکه درکی از آنها داشته باشیم کافی است.

بنابراین، ما به بررسی مشخصات چند دیگ از دورانهای متفاوت بسنده خواهیم کرد. نخست آنچه را که به دو دیگ بخار سگن و استیونسن مربوط می‌شود مورد بحث قرار می‌دهیم. در دیگ



سگن مشخصات زیر دیده می‌شوند: سطح پنجره‌ها، یک مترمربع؛ تعداد لوله‌ها ۴۳ عدد؛ سطح تشعشع ۲۳ مترمربع که ۱۶ متر آن مربوط به لوله‌ها می‌شود؛ قدرت تبخیر ۳۳ کیلوگرم در ساعت برای هر متر مربع با فشار ۱۳ اتمسفر؛ مصرف سوخت زغال‌سنگ برای هر کیلوگرم بخار تولید شده، حدود ۷/۵ کیلوگرم است.

در ماشین استیونسن، سطح پنجره ۰/۵۶ مترمربع؛ تعداد لوله‌ها ۲۵ با سطح تشعشع ۱۳ مترمربع است که ۱۱ متر آن مربوط به لوله‌ها می‌شود؛ قدرت تبخیر آن ۴۰/۵ کیلوگرم در ساعت برای هر متر مربع؛ با فشار ۳/۵ اتمسفر و بالاخره مصرف زغال‌سنگ برای هر کیلوگرم بخار تولید شده، کمی بیش از ۵ کیلوگرم است.

دیده می‌شود که دیگ بخار استیونسن، اقتصادتر است؛ درحالی‌که سبکتر نیز می‌باشد. مشخصات آن مربوط به ماشینی است که مناسب قطارهای سریع‌السیر سبک باشد. دیگ بخار سگن، قدرتمندتر است. این دیگ پیش‌نمونه دیگهای بخاری است که در آینده برای لوکوموتیو قطارهای باری به‌کار برده می‌شوند.

اکنون به لوکوموتیوهای دوران بعد که بیشتر کلاسیک هستند، می‌پردازیم.

مثلاً نوعی ماشین شش چرخ استیونسن ساخت که عنوان مسخره *Patentee* را گرفت. این نوع ماشین را همه ماشین‌سازان انگلیسی و فرانسوی آن زمان - زمانی که در آن توسعه کلی راه‌آهن آغاز می‌شد - می‌ساختند. به‌عنوان نمونه، مدل ساخت شارپس - رابرتس<sup>۱</sup> را بررسی می‌کنیم. این مدل در سالهای ۱۸۴۰ رواج بسیار یافت. در آن پنجره‌ای وجود دارد بقدر یک مترمربع و سطح تشعشع ۵۳ مترمربع، دسته لوله‌های موازی شامل ۱۳۴ لوله با ابعاد متر ۲/۵۴ × سانتیمتر ۴ بودند. وزن این ماشینها حدود ده تن بود. انواع این ماشینها از نظر روش کار هنوز تفاوت‌های زیادی با یکدیگر نداشتند. بنابراین ارقام بالا مشخصات عمومی آنها هستند. در این دوران هنوز فشارسنج فلزی که به مشاهدات کمک کند وجود نداشت و اطلاع از فشاری که لوکوموتیوهای قدیمی تحمل می‌کردند دشوار است. شاید چهار یا پنج کیلوگرم و این مقدار با مقایسه با فشاری که در دیگهای ثابت بود، رقم معقولی به‌نظر می‌رسد.

حدود سال ۱۸۸۰ شش شرکت بزرگ فرانسوی ماشینهای سریع‌السیری داشتند که تفاوت آنها با یکدیگر چندان نبود؛ وزن آنها به‌طورکلی در حدود ۳۸ تا ۴۵ تن و سرعتشان ۶۵ تا ۷۵ کیلومتر در ساعت بود. دیده می‌شود که سطح تشعشعی دیگها از ۹۰ تا ۱۲۹ مترمربع بود و تعداد لوله‌ها بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ عدد. فشار کاری دیگ به‌طورکلی ۹ کیلوگرم بود. یک ماشین بخار قطار باری

در آن زمان کمی بیش از  $5^{\circ}$  تن وزن و  $19^{\circ}$  مترمربع سطح تشعشع - در پرتو لوله‌هایی با طول استثنایی  $5/36$  متر - داشت. فشار کاری دیگ آن نیز  $9$  کیلوگرم بود.

آندره شاپلون جدولهای بسیار جالبی از سطح پنجره و فشار کاری دیگهای سالهای  $1907$  تا  $1935$  تنظیم کرده است، که ما خلاصه‌ای از آن را در اینجا می‌آوریم  
در سال  $1907$  سطح پنجره عموماً  $3$  و استثنائاً  $4$  یا  $5$  متر مربع بود. فشار کاری دیگها  $16$  و گاهی  $12$  یا  $14$  کیلوگرم بود.

در سال  $1914$  سطح پنجره‌ها عموماً از  $3$  به  $4$  یا  $5$  مترمربع رسید، اما فشار کاری دیگ تغییر نکرد. در سال  $1925$  سطح  $4$  یا  $5$  مترمربع پنجره قاعده‌ای شد درحالی‌که سطح  $3$  مترمربع هم در جاهایی بود. فشار کاری دیگ  $16$  گاهی  $17$  کیلوگرم بود؛ گرچه  $14$  و  $12$  کیلوگرم هم هنوز وجود داشت.

سرانجام در سال  $1935$ ، سطح پنجره همه‌جا  $4$  یا  $5$  مترمربع بود و از این حد فراتر نمی‌رفت؛ تنها در چند لوکوموتیو غول‌پیکر امریکایی با کوره خودکار، سطح پنجره بیش از  $7$  مترمربع بود. اما فشار کاری دیگ افزایش یافته بود. اکثر آنها  $16$  تا  $20$  کیلوگرم فشار داشتند که  $16$  حداقل بود. فشار کاری یکی از دیگها  $25$  کیلوگرم بود.

سال  $1935$  را می‌توان پایان تحول لوکوموتیوهای بخاری دانست. گرچه این نوع ماشینها سالهای زیادی پس از این تاریخ به‌کار خود ادامه می‌دادند اما بررسی آنها بیهوده است.

اکنون باید سخنی هم درباره داغ کردن بخار در لوکوموتیوهای بخاری بمیان آورد. این کار از سال  $1898$  که آقای اشمیت دستگاه داغ کردن خود را روی ماشینهای *Eltat* بررسی به‌کار انداخت شروع و بعد بسیار رایج شد. دستگاه داغ‌کننده لوکوموتیو برخلاف دیگهای دیگر بخار همراه با دسته لوله‌های موازی است. بعضی از لوله‌های آن قطر زیاد دارند و یک لوله بخار در داخل آن تشکیل حلقه‌ای شبیه تل سر می‌دهند. از پروفیل‌های بسیار گوناگونی استفاده شده است تا انتقال گرما به بهترین وجه ممکن انجام گیرد.

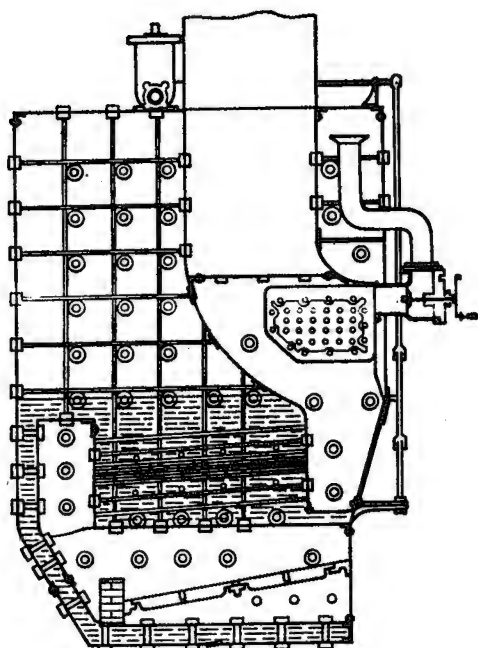
دیگ بخار با برگشت شعله: دیدیم که چگونه دیگ بخار قدیمی کشتی که سطوح صاف داشت به پایان مقاومت خود رسیده بود. برای اینکه فشار بخار را باز هم بیشتر کنند نخست می‌بایست از کوره‌های استوانه‌ای استفاده شود و برای اینکه سطح تشعشع آنها بالاتر رود دسته لوله‌های موازی آن را برگشت دادند. یک دیگ بخار از نوع لنگشر را در نظر بگیرید که روی یک دیگ بخار لوله دودی قرار دارد و دود آن از عقب به جلو کشیده می‌شود، همه آنها در یک محفظه قرار دارد؛ چنین

سیستمی دیگ بخار کشتی با فشار متوسط، معروف به دیگ بخار با برگشت شعله است. محفظه درکل، محافظ سطوح صاف است اما ضمناً به بعضی از بخشهای خود، شکلهای هلالی می‌دهد که منجر به پایداری خاص آنها می‌شود (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۴۶۱، شکل ۸۷).

مآخذ چنین دیگی زیاد شناخته شده نیستند. استیونز در سال ۱۸۳۲ در ممالک متحده امریکا آن را به‌کار گرفته است. جان بورن انگلیسی نیز از طرف دیگر ادعا داشته است که در سال ۱۸۳۸ برای اولین بار آن را ساخته است، اما چنین می‌نماید که در حقیقت وی طرح آن را داشته است نه ساخت آن را. از آقای سیوارد<sup>۱</sup> هم نامی برده می‌شود که در بالای کوره‌های دیگ بخار کشتی خود به نام *Topaze* در سال ۱۸۳۹ یک دسته لوله‌های موازی کار گذاشته است. از سوی دیگر ویلیام و جان پیر در سال ۱۸۳۲ چنین دیگهایی ساختند و آن را به دریاداری انگلستان پیشنهاد کردند، البته همان‌طور که عادت این سازمان بود پاسخ منفی بدانان داده شد. نامی هم از کشتی هلندی به نام *Batavia* برده می‌شود که در سالهای ۱۸۳۹ - ۱۸۴۰ ساخته شد و چنین دیگ بخاری داشت.

امری که قطعی است این است که در سال ۱۸۴۶، یعنی زمانی که آقای جان بورن که شهرتی به هم رسانیده بود درباره ماشینهای کشتی رساله‌ای انتشار داد، دیگ بخار با برگشت شعله کلاسیک شده بود. نخستین کاربردهای مؤثر چنین دیگی در انگلستان به سال ۱۸۴۳ در کشتی *Terrible* با قدرت اسبی ۸۰۰ اسب برمی‌گردد که ماودزلی آن را ساخته بود و نیز در سال ۱۸۴۴ در کشتی باری *Great Western*، یکی از نخستین کشتیهای اقیانوس‌پیما، بود. دیگهای بخار این کشتی، که نخست محفظه‌ای بودند با دیگهای دارای دو شعله برگشتی تعویض شدند. قدرت این ماشین، رسماً ۴۰۰ اسب بود.

در سال ۱۸۵۲ ناوهای جنگی انگلستان و فرانسه جز دیگهای لوله‌ای از دیگهای دیگری استفاده نمی‌کردند (شکل ۶۱). در ممالک متحده امریکا در عوض تا مدتی به سیستم لوله‌های قطور، یا گره‌روهای مدور چندگانه، که نمی‌توان نام گروه لوله‌های موازی بدان نهاد، دلبسته بودند. این سیستم، مجهز به روکشی مدور، گاهی تجاوز از فشار ۲ کیلوگرم را، بویژه در کشتی بخاری فولتن III در سال ۱۸۵۱ ممکن می‌ساخت. در اینجا از روی دیگهایی که بعداً پدید آمدند با سرعت می‌گذریم. در فرانسه یک کشتی بخاری پیشاهنگ به نام *Comte d'EU* برای کارهای شخصی لویی فیلیپ در سال ۱۸۴۶ ساخته شد. مشخصات نوع معمولی کشتیهای فرانسوی معروف به فشار بالا با اجاق طویل و فشار پایین با اجاق کوتاه در سال ۱۸۵۶ رسماً تعیین شد.



شکل ۶۱. دیگ بخار کشتی با برگشت شعله، بدنه با سطوح صاف، مقطع طولی.

دیگهای با برگشت شعله، مشخصات زیر را داشتند: سطح پنجره  $2/5$  مترمربع و برای هر اسب رسمی  $2/3$  مترمربع سطح تشعشع بود. وزن دیگ برای همین واحد قدرت  $140$  تا  $165$  کیلوگرم بود که بسیار کمتر از دیگهای لوله دودی بود. از این وزن  $90$  تا  $100$  کیلوگرم به فلز آنها و  $50$  تا  $65$  کیلوگرم به آب آنها مربوط می شد.

دیگ اسکاتلندی: به کار گرفتن دیگهای پرفشار یک دوره به اصطلاح ماقبل تاریخی دارد. دوره ای که سال  $1820$  آغاز آن است. اینها ردیفی از کشتیهای بخاری رودخانه ای بودند که به دیگهای پرفشار و بدون میعان - کشتیهای سگن در رودخانه رون - مجهز شده بودند.

این کشتیهای بانی پیدایش دیگهای ویژه ای نبودند. در کشورهای آنگلوساکسون از دیگهای نوع ترویشیک و اوزن استفاده می کردند، که شرح آنها داده شد. در فرانسه از سال  $1825$  برای همین کار از دیگهای لوله آبی فرانسوی استفاده می شد. کاربرد این دیگها در کشتیهای رودخانه سن حدود

سی سال ادامه یافت. سرانجام به دیگهای کم‌بیش شبیه دیگهای لوکوموتیو روی آوردند. اما در عوض در دریاها، زمانی که استفاده از فشار زیاد متداول شد، دیگ بخار با برگشت شعله، مانند دیگ قبلی، اما با روکشی کاملاً استوانه‌ای رواج کامل یافت و همه آنها با نام دیگ اسکاتلندی شهرت داشتند. در نوع جدار صاف این دیگها با وجود تقریبی که در روکش آنها اعمال می‌شد، تحمل فشار بیش از چهار یا پنج کیلوگرم را نداشتند. اما وضع داخلی کوره‌های استوانه‌ای و لوله‌ها برای برگرداندن شعله هیچ تغییری نکرده بود. دو سطح جلو و عقب، صاف باقی ماندند و با بستهای محکم به هم متصل می‌شدند. این مجموعه در بدنه‌ای استوانه‌ای شکل جا داده شده بود. هودهای عقب با لایه‌ای از آب، مانند سیستم قبل، احاطه شده بود؛ هودهای جلو، که مدخل دودکش بودند، در خارج قرار داشتند و از ورقهای نازک آهن ساخته می‌شدند. معمولاً مخازن استوانه‌ای برای بخار که دو طرف آنها گرد بودند این مجموعه را کامل می‌کردند.

در سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۹۱۰ در کشتیها تنها از این نوع دیگ استفاده می‌شد. در ۱۹۶۰ دیگهای از نوع لوله آبی با آنها سهیم شدند.

نمونه‌های اولیه این دیگها در کجا بودند؟ در اینجا هم اندیشه پیش از ساخت و کاملاً مستقل از آن بوده است. دیگ بخار اسکاتلندی در سال ۱۸۳۸ در ثبت اختراع فرانسه به اسم کلود دوکلو<sup>۱</sup> آمده است اما با ابعادی بسیار کوچک و برای دیگهای نیم ثابت. چنین دیگی پنجاه سال پس از آن تاریخ با نام دیگ باصرفه، به‌طور مؤثری کار می‌کرده است.

نخستین کاربرد آن گویا مربوط به سال ۱۸۴۵ در کشتیهای بخاری Halfpenny Steamboat روی رودخانه «تمز» می‌شود. هود عقب آن بد طراحی شده بود، شکل شبکلاهی داشت که تنها با یک بست به برجستگی دیگ متصل شده بود. در سپتامبر ۱۸۴۷ در اثر درهم شکستن کوره، انفجار وحشتناکی ایجاد شد. پس از این جریان می‌توان از دیویس انگلیسی و پرینیون فرانسوی در رابطه با چنین دیگ بخاری نام برد. آقای پرینیون سیستم کوره جداسدنی را که خود وی طرح کرده بود به این دیگ افزود. در این سالها طرح استفاده از چند کوره موازی هم پیشنهاد شد.

پاسخ بدین پرسش که در چه تاریخی این نوع دیگ بخار در کشتیهای دریایما گذاشته شد، بسیار دشوار است. کاربرد این دیگ در کشتیهای دریایما در ثبت اختراعات سال ۱۸۴۵ انگلستان به نام پیتز بوری<sup>۲</sup> و در ثبت اختراعات سال ۱۸۵۰ فرانسه نیز با نام وی آمده است. شرح دیگهای وی در ۱۸۵۲ منتشر شده است، کوره‌های این دیگها تخم‌مرغی بودند. در یک اختراع ثبت شده در فرانسه مربوط به سال ۱۸۵۸، در مورد دو آتشه کردن بخار، و در زیر نام پاتریج از اهالی لندن،

دیگی که معرفی شده بود از نوع اسکاتلندی است.

گروهی می‌گویند علت این نامگذاری، کاربرد آن در سال ۱۸۶۲ در کشتیهای Velasquez و Murillo بوسیله آقای راندولف الدر<sup>۱</sup> از گلاسکو بوده است. اما آقای اسکات راسل همین دیگها را در سال ۱۸۶۵ توصیف می‌کند بدون اینکه آن را اسکاتلندی بنامد. آنها هنوز محتوی چند جزئیات اشتباه‌انگیز می‌باشند که بعداً از بین رفتند، مانند کوره‌های تخم‌مرغی و غیره. کار آنها را خوب ارزیابی کرده‌اند.

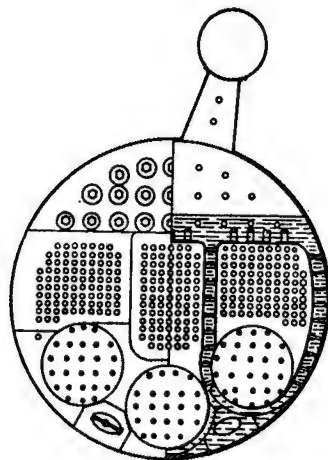
در همین زمان از دیگ ماشین بخار یک کشتی توپدار سخن رفته است که آقای فرستادپوس<sup>۲</sup> سوئدی در سال ۱۸۶۲ در نمایشگاه لندن آن را به نمایش گذاشته بود. فشار کاری این دیگ تنها چهار کیلوگرم بود. دو سال پس از آن، در ۱۸۶۴ بنژامن نورمن همان نوع دیگ را با ورق فولاد برای کشتی بخاری فرانسوای اول خود ساخت. در گذشته این کشتی از دیگ نوع لوکوموتیو استفاده می‌کرد.

از ۱۸۶۴ تا ۱۸۶۷ روی رودخانه دانوب تقریباً ۵۰ کشتی متعلق به آقای اندرته<sup>۳</sup> با دیگهای تخم‌مرغی یا کروی در رفت‌وآمد بودند. یکی از آن کشتیها دارای شش کوره با ۱۰/۲ مترمربع پنجره و ۲۸۴ مترمربع سطح تشعشع بود.

کوششهای آقای کلاپارد فرانسوی از سن - دنی در همین زمان بود. در جریان نمایشگاه سال ۱۸۶۷ وی یک دیگ بخار کشتی توپدار را با فشار کاری پنج کیلوگرم به نمایش گذاشت. تعداد دیگری از انواع دیگها روی لنجهای مخصوص نیروی دریایی در کار بودند.

در سالهای ۱۸۶۸ - ۱۸۷۰ کاربرد دیگ اسکاتلندی در فرانسه و انگلستان متداول شد. در انگلستان در سال ۱۸۶۸ کشتی Head Quarter را آقای ایتکین<sup>۴</sup> از گلاسکو به دیگ اسکاتلندی مجهز ساخت. این دیگها دو کوره به قطر یک متر و ۳۷۴ لوله ۷۵ میلیمتری داشت. قطر لوله‌ها ۳/۲ متر و طول آنها ۲/۴ متر بود. در فرانسه، کشتی فرقت Resohue آقای کلاپارد نخستین کشتی مهمی بود که از آن استفاده کرد. فشار کاری دیگ چهار کیلوگرم باقی ماند. وزن دیگ برای هر اسب ۱۲۰ کیلوگرم بود که ۸۰ کیلوی آن فلز و بقیه را آب تشکیل می‌داد. بهره‌دهی این دیگ نسبت به دیگهای دارای فشار متوسط با جدارهای صاف معمولی، جالب بود.

دیگ بخار اسکاتلندی در جریان تحولات بعدی خود دستخوش تغییرات اساسی نشد، اما در شکلهای گوناگونی ساخته شد. نمای آن ساده یا دوگانه بود. قطر آن به ۵/۲ متر هم بالغ شد و طولش به ۳/۷ متر برای نمای ساده و ۶/۵ متر برای نمای دوگانه رسید. تعداد کوره‌ها ۲ یا ۴، با قطر



شکل ۶۲. دیگ بخار اسکاتلندی. چپ: نیم‌برش از نما؛ راست: نیم‌برش از عرض.

۸/۰ تا ۱/۱ متر بود. در سال ۱۹۰۸ فشارکاری دیگ تا ۱۵ کیلوگرم هم بالا رفت و این به دنبال معمول شدن انبساط چندگانه بخار بود.

روشن است که چنین دستاوردهایی تنها به برکت ورق فولاد و حل چند مسأله فنی مهم امکانپذیر شدند. هرگز ظرفهایی با چنین گنجایش و تحمل فشار ساخته نشده بود. ضخامت جدار دیگ تنها متناسب با تحمل فشار بخار آن نبود، بلکه به قطر آن هم بستگی داشت. هرچند فشارهای بسیار بالا تا زمانی که دیگ ابعاد کوچکی داشت آسان ایجاد می‌شد اما در دیگهای بخار با فشار بسیار کمتر هم دشواری فراوان است. مثلاً نویسنده‌ای در سال ۱۸۸۸ بدشواریهای ساخت دیگ بخار ۴/۵ متری که تحمل تنها ۱۰ تا ۱۲ کیلوگرم فشار را دارد اشاره می‌کند. برای فشارکاری در این حد، باید از ورقهای فولادین به ضخامت ۳۰ تا ۳۲ میلیمتر استفاده شود: «کار کردن با ورقهای فولادین دارای این ضخامت، بسیار دشوار است و برای اینکه در جریان کار کردن روی آنها، ترد و شکننده نشوند، با وجود وسایل قدرتمندی که صنعت در اختیار دارد، باز باید نکات بسیار فراوانی را مراعات کرد» (شکل ۶۲).

طبیعی است که در اینجا هم از امکانات تکمیل جزئیات، که در مبحث دیگ بخار لنکشر با

آنها آشنا شدیم استفاده شود: روکش دیگ از قطعاتی ساخته شده که با لبه‌های بالا آمده به شکل رگه به یکدیگر وصل شده‌اند؛ کوره‌ها نیز حالت رگه‌ای و بعد مواج دارند. با این حال، در اینجا به پایان یک تحول می‌رسیم. برای اینکه از پله‌های فشار بالا برویم باید به دیگ بخار لوله آبی برسیم که همهٔ مزایا را در خود دارد: کاهش وزن آب و کاهش ضخامت جدار دیگ به علت کاهش قطرهای.

## دیگهای لوله آبی

دیگهای لوله آبی مبحثی است که توضیح آن ساده نیست. این دشواری چندین علت دارد. از یک دید سطحی، این سیستم همچون بختکی از لوله‌هاست که کم‌وبیش شبیه یکدیگرند. کسی که در پی آگاهی بیشتر از آنهاست با مانع دیگری برخورد می‌کند: همه می‌دانند که یک اختراع ندرتاً یک مخترع دارد؛ اما در این مورد تعداد افراد مورد بحث به دهها می‌رسد. بالاخره دوران اقدامات کورکورانه هم در این باره به‌طور استثنایی طولی بوده است.

باید کوشید تا معلوم شود که چرا این وضع اتفاق افتاده است، زیرا علت آن، چه‌بسا بتواند در اینکه مسأله را درست‌تر مطرح کنیم تا اندازه‌ای کمک کند.

قبل از هر چیز باید گفت که خود اندیشه گرم کردن آب با تقسیم کردن حجم آن در تعدادی از لوله‌ها، قدمت چندانی ندارد. نویسندگانی که در این باره رأی زده‌اند با یادآوری اینکه در پمپی نوعی آبگرمکن به شکل آتشدانی محیط بر لایه‌ای از آب یافت شده است، برای این ادعا ایراد می‌کنند. نکته جالب برای ما این است که پنجره این آتشدان از لوله‌هایی است که آب در آنها آزادانه جریان دارد. در هر صورت از اواخر سدهٔ هجدهم عملی‌کنندگان طرح پیوسته در فکر دیگهای لوله آبی بوده‌اند. اما در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم است که بیش از پیش تجهیزاتی ساخته می‌شوند که مستعد کار کردن هستند و تنها در سدهٔ بیستم است که این سیستم به رواجی که برای سیستمهای دیگر بی‌سابقه بود دست می‌یابد.

توضیح این امر در دشواری بسیار زیاد ساخت آن است، اما در عوض، امتیازاتی دارد که در سیستمهای دیگر یافت نمی‌شود. باید گفت که این امتیازات، تنها در فشارهای بالا آشکار می‌شوند. بدین ترتیب طبیعی است که پیشرفت سیستم لوله آبی تنها، زمانی صورت گیرد که بالا بردن پیوسته فشار، الزامی شده باشد.

در واقع دیگ بخار لوله آبی برای حجمهای کم آب، سطح تشعشع زیادی ایجاد می‌کند؛ از مدتها پیش بدین خاصیت پی‌برده بودند؛ اما از سوی دیگر همان‌طور که گفتیم لوله‌های کم قطر



در برابر فشارهای بالا استحکامی بیشتر از لوله‌های بزرگتر نشان می‌دهند. بنابراین یک دیگ بخار لوله آبی، با اینکه وزن چندانی ندارد می‌تواند در فشار بالا کار کند و از سوی دیگر اگر انفجاری رخ دهد چون خطری که ایجاد می‌شود با مقدار آب دیگ متناسب است، در حالت فوق میزان خطر بسیار کاهش می‌یابد. در این امتیاز چنان غلو شده است که از دیگهای انفجارناپذیر سخن می‌رانند. اگر جنبه ساخت بسیار دشوار آن را مورد بررسی قرار دهیم می‌بینیم که این دشواری به وجود فشار وابسته است. مشکل پرچکاری قطعات، جوش دادن آنها، بویژه در لوله‌سازی وجود دارد، رشته‌ای که تا آن روزگار مورد بررسی قرار نگرفته بود. لازم بود که از آب‌بندی درزهای فراوانی اطمینان داشت؛ می‌بایست برای خنثی کردن آثار انبساطهای نابرابر، که نیروی آن تقریباً غیرقابل مقاومت است، راهی یافت. ناگزیر باید آزاد کردن سریع بخار تولید شده، تمیزکاری قطعات و بالاخره تأمین جریان داشتن آب را، که در چنین دیگهایی بیش از هر چیز اهمیت دارد، پیش‌بینی کرد. فراهم ساختن این مقتضیات متضاد کار دشواری است. مثلاً سهولت تمیزکاری ممکن است به آب‌بندی زیان برساند و ... این دلایل سبب شدند که ساخت دیگهای لوله آبی تا سالهای پایانی سده نوزدهم، در ردیف خوابی خوش باشد.

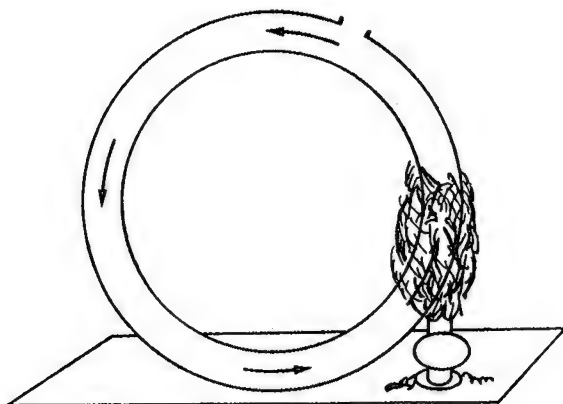
ما گفتیم که از یک دید سطحی، دیگهای لوله آبی همگی با یکدیگر کم‌وبیش شبیه می‌باشند. نیازی به گفتن ندارد که این ادعا هیچ پایه‌ای ندارد، اما تفاوت‌های آنها با یکدیگر زیاد آشکار نیستند و تا اندازه‌ای شبیه وسایل برقی هستند که مدارهای کاملاً متفاوت با یکدیگر، ظاهر یکسانی دارند. می‌توان سه طرز کار مختلف مربوط به سه نوع ساخت دیگهای لوله آبی را از یکدیگر تشخیص داد:

۱) دیگهای دارای جریان بسته یا با لوله‌های مارپیچی، با آبرسانی از پایین، که بخار در بالای آن جمع می‌شود. تنها جریانی که آب دارد برای جانشینی آبی است که بخار شده است. مشهورترین نوع آن، دیگ بخار ژولین بلویل<sup>۱</sup> است که هم در زمین و هم در کشتی کار می‌کند.

۲) دیگهای دارای جریان آزاد یا با لوله‌های تقریباً افقی که از هر دو سر به لایه‌های آب باز می‌شوند. مشهورترین نوع آن، دیگ بخار بیکوک اند ویلکوکس است؛

۳) دیگهای دارای جریان شتابنده یا با لوله‌های تقریباً عمودی، که به مخازن افقی واقع در بالا و پایین دیگ متصل هستند. مشهورترین نوع آن، دیگ بخار استرلینگ است که در خشکی کار می‌کند و دیگهای دوتامپل<sup>۲</sup>، نورمن، ثورنیکرافت<sup>۳</sup> و یارو<sup>۴</sup> هستند که مخصوص کشتیها هستند.

این را هم اضافه کنیم که بسیاری از پژوهشگران درباره نوع جریان آب نظر صریحی ندارند و

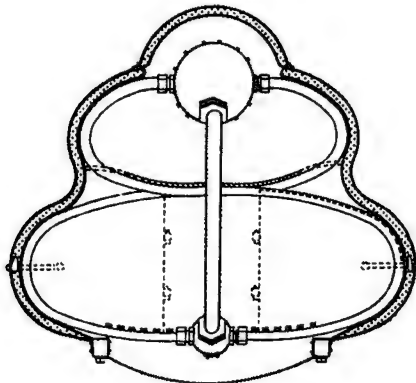


شکل ۶۳. آزمایش گورنه دربارهٔ تبخیر آب در لوله‌ها و جریانی که ایجاد می‌کند.

بنابراین آنها می‌توانند سیستمهایی را پیشنهاد کنند که گاهی هم موفق هستند. مطالبی که تا کنون گفتیم در طول زمان منجر شده‌اند و حال آنکه دیگهای بخار در همان زمان وجود داشتند. ما اینک به بررسی تاریخ دیگهای لوله آبی، حتی‌المقدور در گذر زمان دست می‌زنیم. گورنه؛ ساختهای نخست: برای شروع مطلب، از کارهای گورنه شروع می‌کنیم، شخصی که در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، بسیار افسانه‌مانند بود. آقای گورنه یک تبعهٔ انگلیس از ناحیهٔ کورنوال بود که در جوانی با آقایان ترویشیک و گیلبرت آشنا شد. وی در ۱۸۳۲ یزشکی را رها ساخت تا به بررسی کالسکه‌های دارای دیگ بخار بپردازد و برای این کار در لندن مقیم شد. گورنه به آزمایشی مقدماتی دست زد که باید آن را شرح داد زیرا در زمینهٔ مورد بحث تأثیر قطعی داشته است.

یک لوله شیشه‌ای حلقه‌مانند پرآب را در نظر بگیرید. این لوله در بخش فوقانی خود سوراخی دارد و در یک صفحهٔ عمودی است. پایین این لوله - در ربع پایینی آن - را گرم می‌کنیم. همین‌که آب گرم شد در جهت بالا جریان می‌یابد و نیمه محتوی لوله به گردش می‌افتد. همین‌که غلیان ایجاد شد این پدیده به‌علت سبک شدن وزن مخصوص آب در اثر حضور حبابهای بخار، شدت می‌گیرد. حبابهای بخار از سوراخ بالا بیرون می‌روند، اما دستگاه تا زمانی به‌کار جریان دادن آب ادامه می‌دهد که مقدار آب محتوی آن برای پر کردن بخش بالایی حلقه کافی باشد (شکل ۶۳).

آقای گورنه در سالهای ۱۸۲۵ و ۱۸۲۸ اختراعاتی را به ثبت رسانید که در آنها خطوط اصلی دیگهای بخار با جریان شتابنده دیده می‌شود: دسته‌های لوله‌های موازی تبخیرکننده، جمع‌کننده

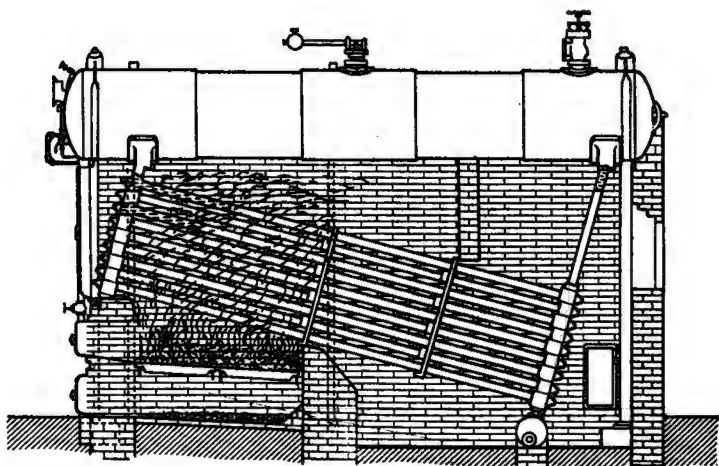


شکل ۶۴. یکی از انواع دیگ بخارهای گورنه، حدود ۱۸۲۵ برای اتومبیلهای دیگ بخاری. بالون جمع‌کننده بخار در بالاست و لوله عمودی سقوط آب در وسط.

بالایی و پایینی بخار، لوله‌های برگشت آب به پایین در خارج از کوره. دستگاه وی شباهت خاصی به دیگهای تندکار آبی کشتیها داشت و با فشار معمولی پنج کیلوگرم کار می‌کرد. کالسکه‌های وی آزمایش خوبی دادند. او در مدت چهار ماه حدود ۳۰۰۰ مسافر را در مسافت کلی ۴۰۰۰ میل، بدون کمترین حادثه جابه‌جا کرد (شکل ۶۴). سرعت معمولی این کالسکه‌ها در هر ساعت ۱۰ میل بود، اما گاهی حداکثر ۳۰ میل هم وجود داشته است. همه می‌دانند که کالسکه‌های بخاری نمی‌توانستند در انگلستان دوام آورند زیرا مقررات خزانه‌داری که در حمایت از وسایل حمل‌ونقل وجود داشت تنها راه آهن را مقرون به صرفه می‌ساخت.

دیگهای امریکایی (بیکوک اند ویلکوکس ۱۸۶۷): دیگهای دارای جریان آزاد این امتیاز را داشتند که لوله‌های آنها نسبت به افق، کمی مایل بودند. این دیگها تبار امریکایی داشتند. ازجمله این دیگها می‌توان از دیگ بخار توی بیل<sup>۱</sup> در سال ۱۸۶۵ نام برد که لوله‌های آن به‌طور عرضی کار گذاشته شده بودند و دو سر آب جنب یکدیگر قرار داشتند. اما دیگ بیکوکس و ویلکوکس است که در سکوی قهرمانی ایستاده است، دیگی که اکنون پس از گذشت یک سده هنوز خدمت می‌کند. پیدایش نخست این دیگ به امتیازی مربوط می‌شود که آقایان ویلکوکس و استیلمان در سال ۱۸۵۶ به نام خود ثبت کردند. در آن زمان لوله‌های این دیگ به‌طور مایل گذاشته شده بودند و دو سر آنها از طریق مخزن استوانه‌ای آب در بالا به یکدیگر مربوط می‌شدند و آنها را سرهای آبی

1. Twibill



شکل ۶۵. دیگ بیکوک اند ویلکوکس.

جریان آب از راست به چپ و با بالا رفتن در لوله‌ها به‌سوی گرم‌ترین منطقه کوره است.

می‌نامیدند که هنوز شکل نهایی خود را نیافته بودند و در آن زمان به‌صورت لایه‌های یکپارچه‌ای ساخته می‌شدند. موفقیت‌های دیگ بیکوکس و ویلکوکس (ثبت نهایی امتیاز در ۱۸۶۷) اصلاحات اساسی را با خود داشت. هر ردیف عمودی لوله‌ها از این پس دارای جعبه‌های ارتباطی - در هر سر، یک جعبه - خاص خود بود (شکل ۶۵). این تجزیه لوله‌ها، خطر از شکل افتادگی آنها را در اثر انبساط بیمه می‌کرد.

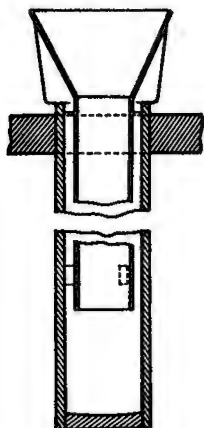
دیگهای بیکوکس و ویلکوکس که در کاربردهای زمینی همه‌جا دیده می‌شدند، جز چند استثنای محدود در هیچ کشتی به‌کار گرفته نشد. سیستم جریان آزاد آب آن به اشکال مشابهی در تعدادی از کشتیها مورد استفاده قرار گرفت. در فرانسه بررسیهای لازم در این باره در سال ۱۸۶۹ در کارخانه اندره بوسیله آقای ژوسل<sup>۱</sup> و نیز در کارگاه دیگ بخارسازی آله<sup>۲</sup> در همان زمانها انجام گرفت و به ساخت چندتایی انجامید. دیگهای فرانسوی، سرهای آبی را یکپارچه نگاه می‌داشت درحالی‌که بیکوک اند ویلکوکس از این کار ابا داشتند. چند شکست در این کار وجود داشت که احتمالاً با این روش ارتباط داشتند.

1. Joessel 2. Allest

در مورد سیستم با جریان آزاد آب می‌توان از یک مدل بسیار بدیع سخن راند، سیستمی که با نام لوله فیلد، دیگ بخار کولت و دیگ بخار نیکلاوس<sup>۱</sup> شهرت یافته است. در این سیستم یک سر لوله تبخیرکننده بسته است و داخل آن، لوله باریکتری قرار دارد که آب از آن وارد می‌شود و خارج شدن آن در جهت مخالف از یک منطقه انحنايي انجام می‌گیرد. در واقع آقای پرکینز، پیشاهنگ فشارهای بسیار بالا در آن زمان این طرح را داشت و آن را در سال ۱۸۳۱ در انگلستان به ثبت رسانید. ده یا بیست سال پس از آن، دیگهای بسله<sup>۲</sup> به بازار آمدند که در اصول شبیه بقیه‌اند. امتیاز فیلد از سال ۱۸۶۲ بود و درباره جزئیات ساخت توضیح داده است (شکل ۶۶). نویسنده بویژه درباره دیگهای کوچک و تا اندازه‌ای قابل حمل فکر می‌کرد. در فرانسه، آقای کولت و پس از وی آقای نیکلاوس در سالهای ۱۸۹۰ - ۱۹۱۰ در دیگهای مهم با اجرای مونتاز به‌روش بیکوک اند ویلکوکس - یعنی برای هر ردیف از لوله‌های عمودی یک جمع‌کننده - لوله فیلد را به‌کار بردند. اما این جمع‌کننده، دوگانه بود و دو محفظه موازی داشت یکی برای جریان فرودی که به لوله‌های مرکزی کوچک با نام لوله‌های هدایت‌کننده، وصل می‌شد و محفظه دیگر، جریان آب مخلوط با بخار را که از مناطق حلقوی می‌آمد به بالا هدایت می‌کرد. سیستمی عالی بود اما تمیز کردن و بویژه تخلیه آن بسیار دشوار؛ و بنابراین تدریجاً از میان رفت.

دیگ بلویل (۱۸۷۷)، دیگ سرپوله (۱۸۸۶): دیگ بخار بلویل نوع کامل دیگ بخار دارای جریان بسته است. این را هم باید اضافه کرد که مدتها این دیگ استثنایی باقی ماند. تنها دیگی که همراه با آن نام برده می‌شد، دیگ بخار بنسن<sup>۳</sup> به تاریخ ۱۸۵۸ است. دیگ بنسن متشکل از دسته‌های زیگزاگی لوله که از پایین آب وارد آنها می‌شد و در یک مخزن خارجی سرریز می‌کرد، گویا در ممالک متحده، به‌عنوان دیگ زمینی رواج بسیار یافت.

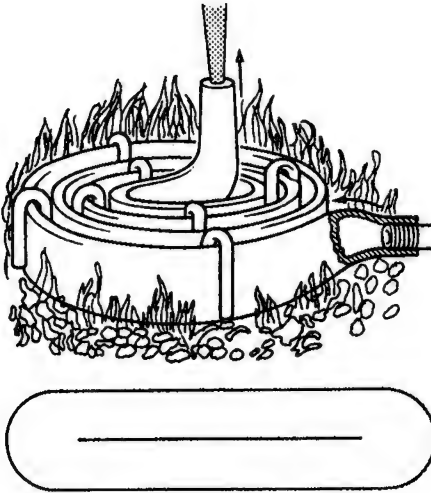
درباره دیگ بلویل باید گفت که هم در زمین و هم در کشتی به‌کار گرفته می‌شد. آقای ژولین بلویل که گویا در سال ۱۸۹۶ زنده بوده است اختراع خود را در سال ۱۸۵۰ به ثبت رسانیده است (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۱۲۰، شکل ۶۱). وی در سالهای اولیه بتنهایی به فکر به‌کار گرفتن لوله‌های مارپیچی پیوسته مانند بنسن بود. او برای رسیدن به طرح نهایی خود می‌بایست ۲۷ سال دیگر - کار می‌کرد. در طرح نهایی وی هر واحد از دو ردیف عمودی لوله‌های راست و کوتاه تشکیل می‌شد که روی هم قرار داشتند و با بستهایی با یکدیگر تشکیل یک مارپیچ را می‌دادند. آب از پایین وارد لوله‌ها می‌شد اما با گذر کردن از مخزن بالایی، تا سر حد تبخیر گرم شده بود. این کار ضمناً باعث رسوب کردن نمکهای نامحلول می‌شد که در ظرف مخصوصی پیش از مارپیچها جمع می‌شدند.



شکل ۶۶. لوله فیلد، کوره را باید حدود پایین شکل در نظر گرفت و دهانه لوله‌ای که در آب شناور است در بالای صفحه حامل لوله‌ها. آب از قسمت خارجی لوله در آن می‌ریزد و درحالی‌که با بخار آمیخته شده است از لوله دوم متحدالمرکزی که درون لوله نخست قرار دارد بالا می‌رود.

مساافتی که نمکها طی می‌کردند در دیگهای بزرگ تا ۴۰ متر هم می‌رسید، که خود در برابر حرکت بخار، مقاومت می‌کردند. دیگ بخار بل‌ویل در ربع نخستین سده بیستم در نیروگاههای برقی هنوز به‌کار می‌رفتند اما با مدار دو مارپیچی تکمیل شده بودند و از این پس هر واحد دو مدار نصفی کوتاهی را تشکیل می‌داد و فرار بخار آسانتر شده بود.

تاریخ کاربرد دیگ بل‌ویل در کشتیها نیز با سالشمار مشابهی همراه است. آزمایشهای نخستین در سال ۱۸۵۶ روی کشتی *Biche* و بعد در ۱۸۶۱ روی *Argus* و *Sainte-Barbe* با لوله‌های پیوسته عملی شد. حدود سال ۱۸۶۶ در کشتی بازرگانی *Vienne* و کشتی تندروی *Actif* و توپدار *Oriflamme* لوله‌ها شکل کنونی خود را به‌دست آورده بودند. برای کرجی تفریحی *Hirondelle* متعلق به دوپویی دولوم که قدرت ماشین آن می‌توانست به ۱۰۰۰ اسب تکامل یابد بل‌ویل دو دیگ به‌دنبال هم ساخته بود: ۱۸۶۹ و ۱۸۷۲، اما باز با موفقیتی برخورد نکرد. او تا زمانی‌که مدل سال ۱۸۷۷ خود را نساخت از پاننشست. این دیگ در ۱۸۷۸ روی کشتی *Voltigeur* کار گذاشته شد و این نقطه شروع رواج دیگهای وی حتی در نیروی دریایی انگلستان بود. تا پایان سده نوزدهم دیگهای بل‌ویل بیشترین کاربرد را داشتند گرچه حدود ده سال برای دیگهای با جریان آب شتابنده آزمایش کرده بود.



شکل ۶۷. دیگ سرپوله، نمایه این دیگ.

در پایین: مقطع عرضی.

لوله‌های باریک، تشکیل ماریچ را داده‌اند.

دیگهای تندکار، آخرین نوع دیگهای با جریان بسته هستند. در واقع دیگهای تندکار به طور کلی محتوی آب نبودند. ظرفی گرم شده بود که تلمبه آبرسانی با هر ضربه پیستون، مقداری آب دقیقاً لازم برای تبخیر بدان وارد می‌کرد. آقای جیکوب پرکینز در دهه ۱۸۲۰، که در ساخت دیگهای پرفشار پیشاهنگ بود دست به کار آزمایشهای دنباله‌داری برای ساخت چنین دیگهایی شد، اما زمان ساخت آنها هنوز نرسیده بود. شصت سال بعد وضع کاملاً دیگر شده بود. در سال ۱۸۸۶ بود که آقای سرپوله امتیاز خود را برای نوع دیگری دیگ تندکار به ثبت رسانید. دیگ وی لوله درازی بود که با نورد، مسطح شده بود «به طوری که تشکیل دو صفحه با فاصله بسیار کم را می‌داد». موفقیت این دیگ فوری بود (شکل ۶۷). خود آقای سرپوله سرش گرم ساخت وسایل راهپیمای بخاری بود و بمنظور ساخت چنین وسیله‌ای به اختراع این نوع دیگ توفیق یافت. طی بیست سال این دیگ کاربرد فراوانی یافت اما، همان‌طور که معلوم است، موتورهای دیگ بخاری نتوانستند در برابر موتورهای انفجاری پایداری کنند.

دیگهای با جریان شتابنده خطاهای راونها (۱۸۵۸-۱۸۷۵): سخنی که مانده است درباره دیگهای دارای جریان شتابنده است. این نوع دیگ از گروه لوله آبی است و پیشرفت آن در سالهای اخیر بوده است. این دیگ را آقای گورنه، مبتکری زودرس ساخته است. ما کارهای روانها را، که همین منظور را بدون رسیدن بدان دنبال می‌کردند شرح دادیم. موفقیت در ساخت چنین دیگی سرانجام با آقای دوتمپل<sup>۱</sup> و ادامه‌دهندگان راه وی بود.

آقایان راون، پدر و پسر: جان مارتین و فردریک جان، برای ایجاد فشارهای بالا در دیگ بخار کشتی، به آزمایش دیگهای لوله آبی اشتغال داشتند. آنان و همکارشان آقای هورتن مورد اعتماد آقای اسکات<sup>۲</sup> مدیر کشتی‌سازی گرینوک<sup>۳</sup> بودند. وی مدت پانزده سال با آنان همکاری کرد. جان مارتین راون در سال ۱۸۵۵ با به‌دست آوردن امتیازهایی که در سال ۱۸۴۰ آقای گرادوک<sup>۴</sup> به ثبت رسانیده بود کار خود را شروع کرد. نخستین دیگ ساخت وی ۲۵۰ اسب قدرت داشت و با ۸ کیلوگرم فشار کار می‌کرد. این دیگ که در کشتی *Thétis* کار گذاشته شد در سال ۱۸۵۸ به اتمام رسیده بود. اطلاع دقیقی از این دیگ در دست نیست. بدون شک با ثبت اختراع سال ۱۸۴۶ آقای گرادوک مطابق بود، لوله‌های تبخیر در ردیفهای عمودی کار گذاشته شده بودند. این نوع دیگ که «از نظر سوخت به صرفه بسیار نزدیک و ساخت آن نیز آسان بود. متأسفانه لوله‌های آن پس از دوازده ماه کار کردن در جاهایی که بیشتر در معرض شعله بود سوختند و در نتیجه با نشستی شدن آنها تأثیر آتش کم شد». معنی این عبارت این است که جریان آب ناقص یا هیچ می‌شد. بدین‌ترتیب این اولین دیگ، بد بود و بین گرادوک و راون نقاری پدیدار شد که نتیجه در سال ۱۸۷۵ از یکدیگر جدا شدند. پس از این جریان آقای هورتن با راون شریک شد. دیگهای نوع *Thétis* بناچار در سال ۱۸۶۱ با ماشین دو انبساطی و کندانسور سطحی کنار گذاشته شدند. آنها در سال ۱۸۶۹ نوع دیگری دیگ بخار را به ثبت رسانیدند. این دیگ همیشه لوله‌های عمودی مخازن بخار آن در بالا و پایین بود و گاهی هم مخازن بینابینی داشت که درست در بالای آتش قرار داده می‌شد و دقیقاً یک دیگ بخار لوله آبی بود. این مکانیسم ظاهراً اقبالی نداشت. در سالهای ۱۸۷۰ - ۱۸۷۲ تعداد زیادی از کشتیها با این نوع دیگ مجهز شدند که پنج فروند از آنها در هند، آبهای بنگال رفت و آمد داشتند. فشار کاری دیگ آنها ۱۰/۵ کیلوگرم بود. بعضی از این دیگها مدت ۶ سال فعال بودند.

ماشین بخار بسیار مهمی نیز در سال ۱۸۷۴ ساخته شد و در یک کشتی پروانه‌دار ۲۰۰۰ دور می‌گردید به نام *propontis* کار گذاشته شد. این ماشین نخستین واحد سه انبساطی بود که در



کشورهای آنگلوساکسون ساخته شد. هر دستگاه شد. هر دستگاه سه مخزن پایین، دو بینابینی و دو مخزن بالا داشت و آب از پایین وارد آن می‌شد. فشار کاری دیگ ۹ کیلوگرم بود. این هم شکست دیگری بود. پس از یک سال کار، این دیگها کاملاً سوراخ‌سوراخ شدند و لوله‌های آنها را می‌بایست تجدید می‌کردند. سپس در سال ۱۸۷۵ به فاصلهٔ چند روز طی ماه سپتامبر، دو مخزن بینابینی ترکیب شدند. علت این امر نابرابری قطر لوله‌هایی بود که قسمتهای مختلف دیگ را از بالا و پایین به یکدیگر مربوط می‌ساختند، که نتیجه آن تخلیهٔ ناقص مخازن بود. به علت مرگ چند نفر در اثر این ترکشها این دیگها کنار گذاشته شدند. نتیجه این حوادث، تأخیر ده ساله در تکمیل دیگها با جریان شتابنده بود.

این حادثه مهلک، خود سیستم را مورد سؤال قرار نداد. اما دیده شد که این دیگها، حتی بدون اینکه حادثه‌ای آفرینند در حد نفی‌کننده‌ای می‌سوختند یا سوراخ می‌شدند. علت این امر نرسیدن آب به سطح مخزن بالایی بود. آقایان راون از اصل جریان داشتن، چیزی نمی‌فهمیدند. چنانچه دیگها می‌توانستند کار کنند بدین علت بود که بخاری که از آنها خارج می‌شد مقدار کافی از آب را با خود داشت تا جریانی از آب را باعث شود که آن را «پننده و کم‌ویش تأمین شده» توصیف می‌کردند. تردیدی نیست که برای کشتیهای رودخانه‌ای این کافی بود. این را هم بگویم که آقای راون پسر، پس از سال ۱۸۷۵ به آزمایشهای خود به‌طور مفیدی ادامه داد و بدون آنکه بتواند این نوع دیگ را به‌طور قطعی بسازد محققاً در افتخار اشخاصی که پس از وی موفق شدند، بویژه توربین‌گرافت، سهیم است.

دوتامپل، پیروزی قطعی در ساخت دیگهای دارای جریان شتابنده: فلیکس دوتامپل یک افسر نیروی دریایی بود. هدف نخستین پژوهشهای وی حمل‌ونقل هوایی با وسایل سنگینتر از هوا بود. وی در این راه یک دیگ بخار لوله آبی هواپیمای خود طرح کرد، اما مخصوصاً همین دیگ بود که نام دوتامپل را ماندگار ساخت.

باید این نکته را تأکید کرد که اختراعی که در سال ۱۸۵۷ دوتامپل به ثبت رسانید شرح مفصل و دقیق نخستین هواپیمای فرانسه است. پس از آقای هنس<sup>۱</sup> که دوتامپل اطلاعی از کارهای وی نداشت، او قطعات اصلی هواپیما را، همان‌طور که بعدها ساخته شد، دقیقاً شرح داده است. وی تصور می‌کرد که با داشتن ۱۷ متر گسترهٔ بالها و یک ملخ چهارمتری، یک موتور شش اسب بتواند سرعتی برابر ۹ متر در ثانیه به هواپیما بدهد، اما چگونگی آن هنوز مشخص نشده بود. او بدون اینکه به ساخت واقعی هواپیما دست یابد روی مدل مورد نظر خود مدت بیست سال به مطالعه و

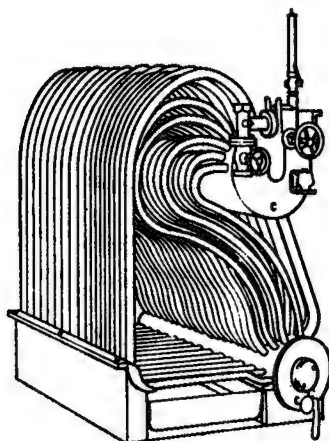
آزمایش پرداخت. نتیجه ملموس کوششهای وی به دست آوردن امتیاز دیگ بخار با جریان شتابنده در سال ۱۸۷۶ بود.

اصول ساخت چنین دیگی همان بود که در دیگ گورنه دیدیم. آب را در لوله‌های بلند و باریک که به مخازن بالا و پایین در خارج کوره راه داشتند سرعت جریان می‌داد؛ لوله‌های برگشت آب، این دو مخزن را به یکدیگر مرتبط می‌ساختند. نویسنده صریحاً می‌نویسد: «دو لوله بزرگ (برگشت) که مقطع هر دو بر روی هم، حداقل برابر مجموع مقطعه‌ها لوله‌های باریک («تبخیرکننده») است.» اصول جریاندیگی آب بروشنی معین شد. در همین زمان است که راون پسر، پس از تحمل شکست در *propontis* به همین نتایج می‌رسد.

دریاداری ملی فرانسه بی‌درنگ به این سیستم علاقه یافت و با دیگهای، نخست کوچک و بعد بزرگ و بزرگتر، آزمایشها را شروع کرد. به آسانی مزیت چنین سیستمی آشکار شد: بالا رفتن سریع فشار، دوام زیاد لوله‌ها، جمع شدن رسوبات آهنی در مخزن پایین، ترکش بدون و خامت امکان ادامه داشتن کار دیگ پس از خرد کردن لوله‌های آسیب دیده. در آزمایش آبرسانی به دیگ خالی و سرخ شده در اثر حرارت، همین نتایج گرفته شد. این دیگ در سال ۱۸۸۲ شکل نهایی خود را با دو مخزن در زیر و یکی در بالا به دست آورد. در سال ۱۸۸۵ تجهیزات *Torpilleur 20* آغاز پیروزی قطعی دیگ بخار با جریان شتابنده و آب را نمایش داد. موفقیت این مدل در ده سال بعد با پیدایش انواع بسیار مهم و بسیار رایجی از آن استحکام یافت.

دیگ تورنیکرافت در ۱۸۸۵ به ثبت رسید. تنها تفاوت اصولی آن با دیگ بخار دوتامپل این بود که لوله‌ها در بالای سطح آب، در مخزن بالایی می‌ریختند (شکل ۶۸). باریک بودن قطر لوله‌ها، جریان تپنده را ممکن ساخت؛ بدین ترتیب که هر بار که مقداری کافی از بخار در لوله‌ها تشکیل می‌شد کمی آب با خود همراه داشت. این مکانیسم را می‌توان عقب مانده دانست اما در واقع جریان سریع آب را تأمین می‌کرد زیرا از پدید آمدن گرداب در مخزن بالایی جلوگیری گرفت. در ده سال ۱۸۸۵ - ۱۸۹۵ دیگ بخار تورنیکرافت به‌طور سیستماتیک در اژدرافکنها جای دیگ بخار لوکوموتیو را که تا آن زمان به‌کار گرفته می‌شد، گرفت.

این نکته را تذکر دهیم که دیگ بخار یارو با لوله‌های مستقیم و بدون لوله‌های برگشت بود؛ اما چندین لایه لوله‌های تبخیرکننده و لوله‌های خارجی، که سردتر بودند، آب را برمی‌گردانیدند. در مورد دیگ نورمن باید گفت که حدود سال ۱۸۹۰ به‌کار افتاد و اقتباسی از دیگ دوتامپل است. دیگ بخار با آب شتابنده یا با لوله‌های تبخیرکننده تقریباً عمودی نیز در نیمه نخست سده



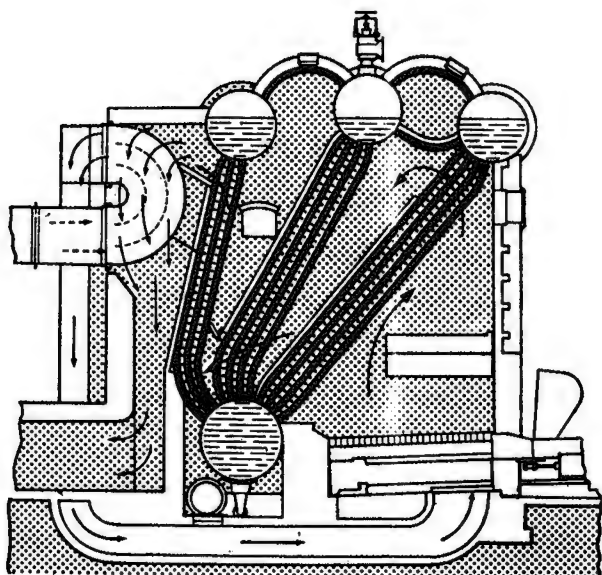
شکل ۶۸. دیگ توربینکرافت، مدلی که معمولاً در اواخر سده نوزدهم در اذربایجانها نصب می شد.

بیستم در کاربردهای زمینی رواج یافت. انواعی از آن وجود دارند که با قطعات اصلی آنها، در دیگهایی که در بالا شرح آنها داده شد آشنا شده ایم. مثلاً مدل استرلینگ دارای سه ردیف لوله است که یک بدنه زیر را به سر بدنه بالایی متصل می سازند (شکل ۶۹). مدل سوسیته آلماسین دارای این برتری است که یک ردیف لوله، دو بدنه را به هم مربوط می سازد و غیره. جزئیات این مکانیسمها، اهمیت چندانی ندارند (گذرگاههای سوختی در آنها بهتر شده است) زیرا اصول کار آنها تغییری نکرده است.

دیگهای بزرگ جدید: در پایان این سخن، ما مجموعه تحول دیگهای نیروگاههای حرارتی را در نیمه نخست سده بیستم بتندی مرور می کنیم. انتخاب نیروگاههای حرارتی بدین دلیل است که در این مراکز با دیگهای مهم و نوین روبه رو هستیم.

به طور کلی این تحول بر پایه کاهش بهای انرژی پیش رفته است. حدود سال ۱۹۵۰ بهای هر کیلو وات در ساعت (مصرف خانگی) یک چهارم بهای آن در پیش از سال ۱۹۱۴ بود (ضریب افزایش ۴۲ می باشد، در حالی که ضریب کلی افزایش وسایل زندگی در حدود ۱۷۰ بود). در رشته مورد بحث ما، پیشرفت در افزایش ابعاد و دما و نیز بازده انجام گرفت. حدود سال ۱۹۰۰ دیگ بخاری با تولید شش تا هشت تن بخار در ساعت، ابعاد غول آسا داشت. حدود سال ۱۹۵۰ در شهر ژنویله دیگی کار می کرد که ۲۴۰ تن بخار در ساعت تولید می کرد و در مثلاً شهر ویتری سود<sup>۱</sup> دیگی

1. Vitry-sud



شکل ۶۹. دیگ استرلینگ، حدود ۱۹۲۵.

سه ردیف لوله‌های تبخیر. پیچ و خمها گاز کوره را ناچار از مسیری زیگزاگ عبور می‌دهند. این مدل شامل دمی است که کشش هوا را تسریع می‌کند، یک دستگاه گرم‌کننده هوا و یک کوره اتوماتیک است.

۴۵۰ تن بخار تولید می‌کرد. پانزده سال پس از این مدت به دیگ ۷۶۵ تنی در شهر پون سورسامبر<sup>۱</sup> بر می‌خوریم و حتی ۱۸۱۵ تنی در پورشویل B<sup>۲</sup>. حدود سال ۱۹۰۰ فشارکاری دیگ از ۱۲ به ۱۵ کیلوگرم رسید و دمای بخار از ۲۵۰ به ۳۰۰ درجه صد بخشی. پنجاه یا شصت سال پس از آن، فشارهای ۱۲۰، ۱۵۰ و حتی ۱۷۵ کیلوگرم و دماهای ۵۰۰ و ۵۲۵ درجه صد بخشی، شدیم رایجی بود. طی نیم سده بازده دیگ از ۷۵ به ۹۰٪ رسید.

بهرتر شدن چرخه کار با توربینها، این مشتری یگانه دیگهای کنونی دو کار جدید را موجب شد: داغ کردن دوباره بخار طی دانات؛ گرم کردن مقدماتی آبی که وارد دیگ بخار می‌شود در مرحله بین کندانسور و دیگ، بوسیله بخاری که در جریان دانات گرفته شده است، در طبقات کم فشار توربین. این عملیات، تغییراتی را در ساختمان دیگ بخار پدید آورد. تعداد ردیف لوله‌های تبخیرکننده به مقدار زیادی کم شد زیرا تبخیر در دمای بالا انجام می‌گیرد. وانگهی آب گرم شده

1. Pont-sur-sambre 2. Porcheville B

وارد دستگاه پیشگرم‌کن می‌شود؛ در نتیجه، این دستگاه در دمای بالا کار می‌کند. بدین ترتیب، این دستگاه نمی‌تواند گازهای سوخته را تا دمای دودکش سرد کند. این نقش، قطعه جدیدی را طلب می‌کند و آن، گرم‌کننده هوا بود. اما کوره‌ای که با هوای گرم تغذیه می‌شود در دمای بالا کار می‌کند. بنابراین آن را با به اصطلاح پوشش آبی اجاطه می‌کنند و آن لوله‌هایی است که در تبخیر آب سهیم می‌شوند.

با کار سیستماتیک تحقیقی برای کاهش اتلاف، بازده دیگر را می‌توان بالا برد. این اتلاف در سه بخش صورت می‌گیرد: از راه تشعشع، از راه نیم‌سوز شدن و بالاخره بویژه اتلاف دما از راه دودکش. برای کم کردن این اتلاف سوم است که گرم‌کننده مکانیکی را مورد استفاده قرار می‌دهند. همه هوای اضافی مقدار هنگفتی گرما به همراه خود بیرون می‌برد. این امر در گذشته زمانی اتفاق می‌افتاد که قشر مواد سوختی هموار نبود، بویژه زمانی که در پیچه‌ها برابر نیستند. این حالت پیدایش انواع کوره‌های خودکار را ناگزیر ساخت: پیچره‌های مکانیکی؛ پیچره‌های مدرج (کوره‌های دارای سوخت‌پاش)، کوره‌هایی که هنوز خرده زغال می‌سوزانند. در آمریکا، حدود سالهای ۱۹۲۰ کوره‌هایی که با خاکی زغال گرم می‌شدند ساخته شدند (کوره کرامر<sup>۱</sup>، کوره سایکلون<sup>۲</sup>)، که کوره‌های با سوخت مایع یا گازی بدون هیچ اشکالی جانشین آنها شدند. در اینجا این نکته را هم بگویم که کاربرد روکش فلزی و آب‌بندی شده بدلیل نفوذپذیری دیوارهای آجری کوره مفید بود؛ ورود هوای بیرون به علت تورفتگی کمی که بر آن حکومت می‌کرد به آسانی به ۱۰٪ می‌رسید. پیشرفت وسایل فرمان سوخت: کنترل بخار، کنترل هوا، دماسنج دمای گازهای خروجی، دستگاه آنالیزکننده‌ای که مقدار CO<sub>۲</sub> گازهای خروجی را برای اطلاع از زیاد بودن هوا تعیین می‌کند، توانستند در سال ۱۹۵۰ خودکار بودن امر سوخت را با کمک انواع سروموتورها تأمین کنند.

حال ببینیم که دیگر بخار از نظر شکل و ساخت چه تحولاتی را پشت سر گذاشته است؟ کوره، که در گذشته شمع‌ای درباره آن گفته‌ایم مربوط به دیگر بخار دارای تشعشع زیاد است، یعنی تقریباً همه سطح تشعشع در معرض شعله می‌باشد و با تشعشع گرما کار می‌کند. در مقابل، سطوحی که با روش همرفت (کنوکسیون) گرما عمل می‌کنند اهمیتشان کم شده است و این حالت نقطه مقابل دیگهای قدیم است. از این پس ۸۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم آب در ساعت، در هر مترمربع، به جای ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم سابق تبخیر می‌شود. این موفقیت هم مرهون کار بوسیله تشعشع است، اما باید جریان آب سریع باشد. با آزمایشهایی که آقای یارو- که دیگر مورد استفاده وی در بالا شرح داده شده است انجام داد، گرایشی به حذف برگشت آب پدید آمد؛ بازگشت آب با لوله‌های دارای گرمای

کمتری انجام می‌شود. این کار چندین حادثه را در ردیف لوله‌های بینایی به علت نامعلومی، سبب شد. رفع این عیب در جداسازی ردیف لوله‌های بالارونده از لوله‌های پایین‌رونده، مثلاً با گذاردن دستگاه داغ‌کننده، میان آنها بود.

ردیف لوله‌های داغ‌کننده نیز باید از فولادهای آلیاژی مقاوم در  $400^{\circ}$  درجه ساخته شده باشند. در توربینها میل به داغ کردن زیاد بخار وجود دارد زیرا این کار مانع پیدایش قطرات آب در پایان دتانت است؛ قطرات آب به پرگان توربین آسیب می‌رسانند. ما دیدیم که دستگاه پیشگرم‌کن را به علت دمایی که در آن کار می‌کرد کاملاً تغییر دادند. کار تبخیر می‌تواند در آنجا انجام گیرد. در واقع این دستگاه به ضمیمه‌ای از ردیفها لوله‌ها تبدیل شد. در مورد دستگاه گرم‌کننده مجدد هوا، دیدیم که نقش دستگاه قدیم پیشگرم‌کن از این پس به گرم‌کننده هوا محول شد. این قطعه بسیار مهمی است؛ سطح آن غالباً بزرگتر از سطح دیگ است، اما از آنجا که بدون فشار کار می‌کند می‌تواند ساختمان سبک و ارزان داشته باشد.

باز هم می‌توان از تعداد زیادی وسایل جالب، از نظر تمیز کردن قطعات مختلف، یا غبارگیرهای الکتروستاتیکی، مثلاً دود سخن راند. پیش از هرچیز، پیدایش نوع تازه‌ای دیگ را تذکر دهیم که تکامل واقعی آنها احتمالاً به آینده تعلق دارد. در این نوع دیگ، تلمبه، آب گرم مخزن بالایی را با فشار در لوله‌ها می‌راند. از این نوع دیگ می‌توان انتظار زیاد شدن وزن بخار تولید شده در هر ساعت در هر مترمربع را داشت. وانگهی، جنبه‌ای که انقلابیتر است، دیگهایی با سوخت تحت فشار وجود دارند. تکنیک این نوع دیگ، نتیجه تحقیقات روی توربینهای گازی و توربو راکتورهاست. با این دیگها اندازه‌ها بسیار کوچک می‌شوند وانگهی سرعت شاره‌گازی نیز از عوامل بهتر شده تبادل گرما می‌باشد (دیگ Velox).

### کندانسورها

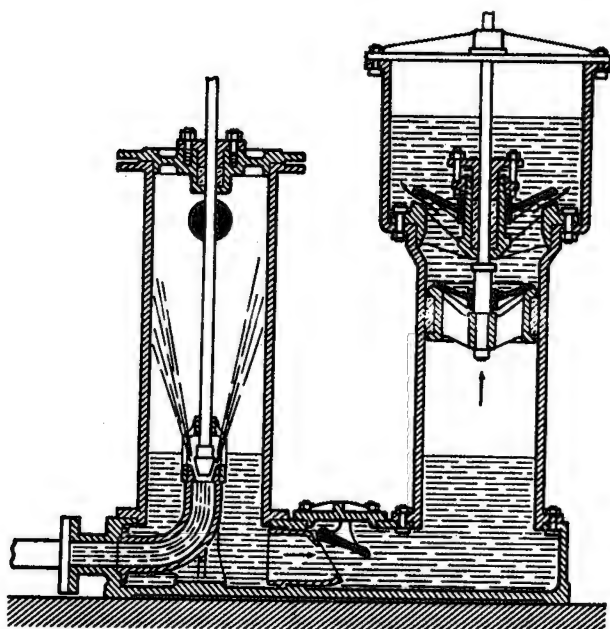
مسئله میعان را چگونه باید حل کرد؟ باید نخست به داده‌های فیزیکی توجه کرد که با گذشت زمان هیچ تغییری نیافته‌اند. کندانسور همیشه بخار کم فشار دریافت می‌کند، خواه از مرحله دتانت گذشته باشد، خواه نگذشته باشد. باید گفت که هر کیلوگرم بخار حدود  $600^{\circ}$  کالری وارد این دستگاه می‌کند. با دانستن دمای آب خنک‌شونده موجود و دمایی که می‌خواهیم کندانسور داشته باشد محاسبه وزن آب به‌کار رفته برای مایع کردن وزن معینی از بخار، کاری بسیار آسان است. در عمل، دمای کندانسور  $40^{\circ}$  و دمای آب سرد  $15^{\circ}$  درجه است. بدین ترتیب، می‌بایست  $22$  کیلوگرم آب برای هر کیلوگرم بخار

وجود داشته باشد. این اندازه تقریبی در قدیمترین نوشته‌های مربوط به این رشته ضبط شده‌اند. هوای حل شده در آب ۱۵ درجه و فشار یک جو، در حدود ۵٪ حجم این آب است. در کندانسور به علت بالا بودن دما و پایین بودن فشار، آزاد شدن نسبی بخار پدید می‌آید. بدین ترتیب، مخلوط آب و هوا را می‌توان برابر  $1/30$  لیتر در کیلوگرم بخاری که از کندانسور خارج می‌شود ارزیابی کرد. از همین روی تلمبه‌ای که این وظیفه را به انجام می‌رساند از همان زمان وات نام تلمبه هوا داشته است.

برای میعان دو روش وجود دارد. از نظر تاریخی این دو روش به توالی یکدیگر آمده‌اند. کندانسورهای قدیمی از نوع تزریقی یا آمیزه‌ای بودند. بدین ترتیب که آب سرد در ظرفی تزریق می‌شود که بخار با خارج شدن از سیلندر در آن وارد می‌شود. این نوع کندانسور، بتنهایی حدود یک سده تمام در زمین و کشتی به کار گرفته می‌شد.

روش دوم، مایع شدن بخار بر اثر تماس با یک جدار سرد است که روی دیگر آن با آب سرد خنک می‌شود. این روش به میعان سطحی شهرت دارد. این نوع وسیله، کار کردن دیگ بخار در یک مدار بسته را ممکن می‌سازد. شاید بدین علت باشد که این روش نخست در کشتیها عملی شد تا اینکه آب مشروب به دیگ داده شود. برای این روش یک دوره آزمایش در  $1840 - 1860$  و یک دوره رواج در  $1860$  تا  $1880$  را می‌توان تشخیص داد. پس از این تاریخ به علت تغییر شکل ماشینهای کشتی، اندیشه به کار بردن وسیله دیگری در دریا محال شد. بعدها در اواخر سده نوزدهم، در روش میعان سطحی، به دنبال پیدایش توربین که کندانسور از آن تجزیه‌ناپذیر است تحول تازه‌ای ایجاد شد، و بدون اینکه تغییر شکل اساسی یابد، در اوایل سده جاری به دستگاههای بسیار قدرتمندی تبدیل شد.

کندانسور تزریقی: چون ماشین نیوکامن دارای مرحله تزریق آب سرد در استوانه خود بود می‌توان گفت که این ماشین با میعان تزریقی کار می‌کرد. در این دوره هنوز مفهوم مقدار گرما وجود نداشت و معلوم است که از مفهوم گرمای ویژه و گرمای نهان هیچ نمی‌دانستند. بخوبی آشکار است که آنها می‌بایست به تنظیم مقدار تزریق به طوری که ماشین بنحو قابل قبولی کار کند، بسنده کنند. با این حال، آقای اسمیتون که می‌فهمید که می‌توان امیدوار بود که استوانه را فقط به اندازه‌ای سرد کرد که برای رسیدن به درجه لازمی از خلأ کافی باشد کوشید عمل را مستدل سازد. نمی‌توان محاسبات وی را دنبال کرد. او فقط توانست قاعده زیر را پیشنهاد کند: دمای میعان دارای بهترین بازده، نسبت معکوس با ریشه پنجم قطر استوانه دارد. ما متقاعد شده‌ایم که استدلال نظری آقای اسمیتون برای



شکل ۷۰. کندانسور تزریقی، شبیه کندانسوری که وات به کار برد. چپ: خود کندانسور؛ راست: تلمبه هوا. شیرهای تلمبه هوا دوگانه می باشند تا مکیدن همزمان هوا و آب ممکن باشد.

توجیه این قاعده، آشکارا بر پایه اطلاعات به دست آمده از عمل بوده است. نخستین کندانسورهای تزریقی، به ماشینهای وات تعلیق داشتند که دارای فشار کم و شاهنگ (بازوی نوساندار) بوده است. تا زمانی که ماشینهای شاهنگی ساخته می شد دستگاه همان شکلی را که مخترع آن، پس از پایان آزمایشها، پیشنهاد کرده بود حفظ می کرد: استوانه ای به طور عمودی در ظرفی از آب سرد گذاشته می شود و در نتیجه زیر سیلندر موتور قرار می گیرد. با عمل ساده مکش، تزریق انجام می گیرد. خود کندانسور به تلمبه هوای خود تکیه دارد. درحالی که هم از نظر شکل و هم از لحاظ گنجایش، تقریباً با آن یکی است و از راه یک لنگ عمودی، که پیستون آن را به شاهنگ ماشین متصل می سازد حرکت به آن انتقال می یابد (شکل ۷۰). وات در کار خود به قطر هر یک از این دو ظرف، دوسوم قطر پیستون موتور را می داد. این



مطلب نشانه آن است که تلمبه هوا بسیار بزرگتر از اندازه حداقلی است که از راه نظری به دست می آید. در چنین حالتی، کار جذب شده، بسیار زیاد است (برحسب زمانها و سیستمهای مختلف از ۲/۲ تا ۴/۴٪ پیش می رود)، اما چون مقدار خلأ در کندانسور بیشتر و نیز به علت اینکه راه اندازی آن ساده تر است. مقداری صرفه جویی در کار ایجاد می شود.

در مورد ظرفیت کندانسور، باید گفت که هیچگاه قاعده روشنی برای تعیین آن نبوده است. مسأله بسیار مهم این است که میعان به محض باز شدن دریچه فرار، صورت گیرد تا در آغاز رفت پیستون، فشار متقابلی ایجاد نشود. این منظور به زیاد کردن گنجایش می انجامد. اما این محدوده بسیار تنگ را بدون برخورد با دشواریهای برخاسته از حفظ خلأ و بویژه مشکلات سنگین مربوط به تخلیه در لحظه شروع کار نمی توان درهم شکست. بنابراین ساختمان کندانسور در مجموع تقریباً همیشه به آنچه که وات در ابتدا پذیرفته بود وفادار ماند.

در این نوع کندانسور، تلمبه هوا از نوع یکطرفه و دارای سه دریچه بود که یکی در مقابل پیستون، دیگری روی آن و سومی در پشت آن قرار داشت. در واقع نباید فراموش کرد که مسأله تلمبه کردن همزمان آب و هوا با فشاری کمتر از جو در میان بود. در این نوع تلمبه مورد بحث ما، با پایین آمدن پیستون، هوای زیر آن فشرده و هوای روی آن رقیق می شود به طوری که بلند شدن دریچه روی آن آسان می گردد.

برای بررسی تفصیلی تحولات کندانسور وابسته به ماشینهای ثابت فرصتی نیست. هیچ تغییر اساسی در آن پدید نیامد؛ دستکاریهایی که در آن شد مربوط به فعال کردن آسان تلمبه هوا بود. در ماشینهای افقی، تلمبه هوا را معمولاً در دنبال یک استوانه می گذاشتند و در آن صورت کندانسور شکل یک جعبه چدنی را داشت که در جای خالی فونداسیون ماشین گذاشته می شد.

چند کلمه ای هم باید درباره کیفیت خلأ و وسایل اندازه گیری متصل به کندانسور بگوییم. موقعی خلأ کم گفته می شود که فشار برابر ۰/۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد؛ خلأ خوب، فشاری برابر ۰/۸ کیلوگرم و خلأ بسیار خوب ۰/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است. همان طور که در آینده باز خواهیم گفت، برای ماشینهای پیستونی، تنها خلأ خوب کافی است.

وسيلة معمول اندازه گیری که روی کندانسورها گذاشته می شد، نشانگر خلأ نام داشت. این وسیله تفاوت فشار اتمسفر و فشار مسلط بر کندانسور را برحسب میلیمتر جیوه نشان می داد، کاری که نیاز به تصحیح برحسب فشار هوا داشت. از سوی دیگر، دماسنجی دما را اندازه می گرفت و بدین ترتیب می توانستند فشار بخار را به دست آورند. تفاوتی که غالباً بین دو مشاهده وجود داشت، دلیل بر

این بود که در اثر وجود هوا در کن‌دانسور، فشار تا چه اندازه زیاد شده است. فشارسنج جیوه‌ای و دماسنج در اواخر سده هجدهم به شکلی در روی کن‌دانسور به کار برده می‌شدند.

کن‌دانسورهای سطحی: میعان در سطح از جمله روشهایی است که ریشه نامعلوم دارد، آقای سیوری از این روش برای خنکسازی یک جریان آب در بیرون ظروف بخار استفاده کرده است. همچنین آقای نیوکامن در مرحله تحقیقات خود، این جریان آب روی استوانه را به کار گرفته است. اما در عمل، کاربرد آن با فشار زیاد، در کشتیها حدود سال ۱۸۸۰ صورت گرفت، در این کن‌دانسورهای سطحی از آب شیرین برای آبرسانی به دیگها و از آب شور برای خنک کردن استفاده می‌شد. در گذشته تاریخ ماشینهای دوا یا سه انبساطی بررسی شد و نیازی به بازگشت به آنها نیست؛ تنها باید این نکته را افزود که کاربرد آنها بدون کن‌دانسورهای سطحی، ممکن نبود.

بدون چنین وسیله‌ای، اهمیت کارایی، که در باز نمودن آن تا این اندازه کوشیدیم قابل درک نیست. ما دیدیم که موتورهای با صرفه با بالا بردن نسبت وزن مفید از ۲۰٪ به ۳۰٪ دارای کارایی ۵۰٪ خواهند بود. به عبارت دیگر، چنان‌که بخواهند قدرت بالا رود با صرفه‌جویی ۲۰٪ از وزن زغال مصرفی، حدود ۱/۸ کارایی خواهد بود. این پیشرفت مدیون ماشینهای دارای انبساط چندگانه است، اما این نوع ماشینها بدون داشتن دیگهای پرفشار میسر نیستند. دیگهای پرفشار آب شور را نمی‌پذیرند و بنابراین در تحلیل آخر، ماشینهای دارای انبساط چندگانه در کشتی نمی‌توانند بدون کن‌دانسور سطحی باشند.

در فشار کم، کار با آب دریا، اگر استخراجها بخوبی تنظیم شده باشند کاملاً کافی است. ما در مورد دیگهای بخار دیدیم که اتلاف گرمایی ناشی از استخراجها، حداکثر ۵/۵٪ است که بخشی از آن را می‌توان با دستگاه دوباره گرمکن جبران کرد. با فشار کم، کن‌دانسور سطحی همیشه کار پر زحمتی بوده است، زیرا چون این نوع ماشینها وزن زیادی بخار بیرون می‌دهند، جای زیادی می‌گیرند. دست‌وپاگیری این ماشینها و وزن بخار زیاد سبب می‌شوند که بهای بخار تولیدی گزاف باشد. با به کار گرفتن فشار بالا اوضاع کلی تغییر می‌کند. استفاده از آب دریا هم به علت شوری آن و هم به مناسبت داشتن سولفات کلسیم - که در دمای ۱۴۰ درجه رسوب می‌کند و تشکیل لایه‌هایی می‌دهد که مانع استخراج هستند - ممکن نیست. وانگهی وزن بخار مصرفی با ۵۰٪ کاهش سبب می‌شود که ابعاد کن‌دانسور به همین نسبت کوچک شوند.

این نکته را هم می‌توان افزود که در اواسط سده نوزدهم از شست‌وشوی مواد چربی که دهانه لوله‌های باریک را - که لازمه هر کن‌دانسور سطحی هستند - می‌بستند با سود محرق آگاه نبودند.

وانگهی صنعت لاستیک آن قدرها پیش نرفته بود که بتواند ماده مناسبی برای آببندی خوب درزها تأمین کند؛ این مواد بعدها شناخته شدند.

همه این دلایل گواهی می دهند که دوران بررسیها و آزمایشها در این قسمت بسیار طولانی بوده است. در مطالب بعدی ما فقط به کارهای انجام یافته می پردازیم و به طرحها کاری نداریم. گفته شده است که وات زمانی یک کندانسور سطحی با لوله های قلعی را مورد آزمایش قرار داد اما نتایج بد این آزمایش که خلاکم و کبره بستن لوله ها بود سبب شد که بی درنگ از آن صرف نظر کند.

آقای کارترایت حدود سال ۱۷۹۷ در ماشین بخار الکلی خود منظمأ از کندانسور سطحی استفاده می کرد. و این نخستین کاربرد مستمر این وسیله، گرچه روی ماشین غیرآبی است. در واقع از نتایجی که کارترایت از کاربرد آن گرفت اطلاع کمی در دست است.

پس از کارترایت باید تا سال ۱۸۲۲ پیش رفت تا با کشتی *Post Boy* برخورد کنیم که در رودخانه کلاید آمدورفت داشت. این ماشین ۳۰ اسبی ساخت آقای جان نیر بود. این کندانسور از نوع لوله های بخار، به طول  $3/60$  متر و قطر ۱۵ میلیمتر بود. گویا چند سال کار کرده است.

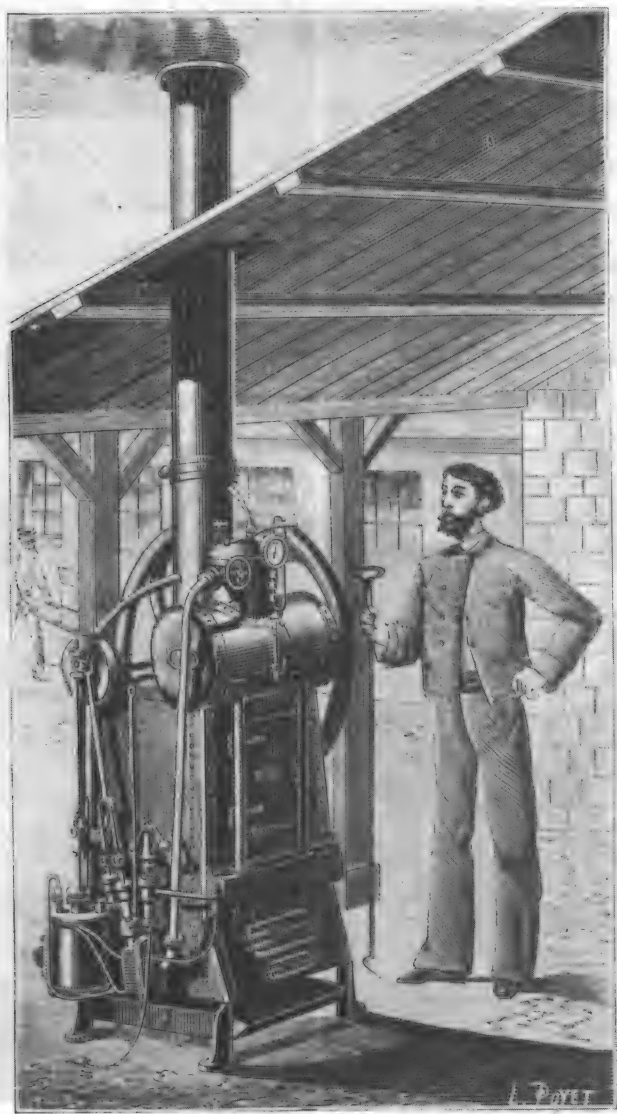
حدود سال ۱۸۲۹ ما با کارهای آقایان بریثویت<sup>۱</sup> و اریکسن آشنا می شویم که از کندانسورهای دارای بیست مترمربع سطح متشکل از لوله های بخار ۴۴ میلیمتری استفاده می کردند. می توان از کشتی *Louis* نام برد که در سرن در کارخانه جان کاکریل ساخته شد و کمی بعد یک کندانسور معمولی روی آن گذاشته شد. از آن بدشانستر کشتی *Victory* بود که جان راس<sup>۲</sup> سفر قطبی خود را در سالهای ۱۸۲۹ - ۱۸۳۳ با آن انجام داد. این سفر در ماه مه ۱۸۲۹ آغاز شد، کندانسور سطحی کمی پس از این تاریخ کنار گذاشته شد و در ماه اکتبر همان سال همه قسمت موتور را برداشتند و مجموع هیأت، مسیر خود را با بادبان ادامه داد! به یاد آوریم که در جریان همین سفر بود که محل دقیق قطب مغناطیسی شمال برای نخستین بار معین شد.

طی سال ۱۸۳۰ دو کشتی بخاری گارون با نامهای: اومنیوس و اندوستری مدتی با کندانسور لوله بخار کار می کردند. این دستگاهها ساخت آقای باسک کین<sup>۳</sup> بودند.

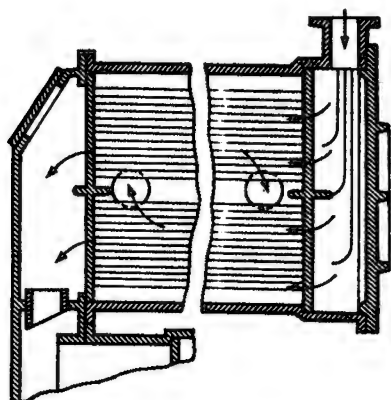
نکته دیگری را هم باید یادآور شد و آن آزمایشهایی است که در سالهای ۱۸۲۵ تا ۱۸۴۱ به توسط آقایان هوارد و سایمینگتون روی کندانسورهای تک آبه انجام گرفتند. در این نوع کندانسورها، که رواج نیافتند، کندانسور از نوع افشانکی بود با این تفاوت که همیشه با یک آب کار می کرد. آب در یک تبادل کننده حرارتی، که در سطح بود، خنک می شد.



تابلوی ۵. لوکوموتیو Flèche DOR خط پاریس - کاله، حدود ۱۹۳۵.



تابلوی ۶. دیگ بخار لوله آبی فلیکس دوتامیل، حدود ۱۸۷۷.



شکل ۷۱. کندانسور سطحی، ساخته هال، ۱۸۳۷.  
بخار برای مایع شدن وارد لوله‌هایی می‌شود که در آب سرد شناور هستند.

اینک به مهمترین قسمت بحث خود وارد شویم که سرگذشت آزمایشهایی است که سمیوئل هال در انگلستان انجام داده است. وی پس از اینکه امتیازی را در مورد نه‌تنها طرح بلکه همچنین نسبتها و طرز ساخت، به‌دست آورد توانست سیستم خود را با اطمینان فراوان در مدتی تقریباً برابر هشت سال از ۱۸۳۸ تا ۱۸۴۶ روی چند کشتی بخاری آزمایش کند (شکل ۷۱). آقای تامس تردگلد، نویسنده نامدار انگلیسی در تحریر. سال ۱۸۳۹ خود درباره ماشینهای بخار از ۱۱ ناو نام می‌برد که قدرت ماشینهای آنان تا ۳۰۰ اسب پیش می‌رفت. در این باره چیزی فراموش شده است و آن یک ماشین بخار ۵۰۰ اسبی است که کشتی پرزیدنت ۲۰۲۸ تنی اقیانوس‌پیما با آن مجهز شده بود. این کشتی در زمان خود زیباترین و بزرگترین بود. غرق کامل آن در ماه دسامبر ۱۸۴۱ در دریا یک تراژدی بود و آثار ناگواری در کندانسورهای سطحی داشت. با اینکه از این کشتی هرگز خبری به‌دست نیامد نمی‌توان تصور کرد که کندانسور در این غرق شدن تأثیر داشته است. باز یک ماشین ۷۰۰ اسبی متعلق به کشتی نوع فرقت *Penelope* را مثال می‌زنیم.

طرحهای مورد قبول آقای هال چگونه بوده‌اند؟ وی میعان ۲۵ کیلوگرم بخار در ساعت برای هر مترمربع را می‌پذیرفت. این شرط، در محاسبه، مربوط به ماشین کم‌فشار ۰/۸ تا ۰/۹ مترمربع سطح میعان برای هر اسب است. تلمبه آب سرد لازم برای تأمین این جریان آب باید بتواند ۲۷۲۰ لیتر آب را در هر ساعت برای مایع کردن ۴۵/۶ مترمربع بخار، در همان مدت یا ۱۳۵۰ لیتر آب در ساعت برای هر اسب را جابه‌جا کند. این ارقام همانهایی هستند که در شرح مختصات امتیاز

به ثبت رسیده آمده‌اند. به‌عنوان نمونه ساخت، می‌توان کندانسورهای کشتی ویلبرفورس را که آقای تردگلد شرح داده است بررسی کرد. دو کندانسور در کشتی بود که هرکدام دارای ۲۳۷۴ لوله مسی ۱۲/۵ میلیمتری به طول ۲/۲۴ متر داشتند. این ماشین ۵۶۷ اسب محاسبه شده قدرت داشت فشار آن ۱/۳ کیلوگرم بود و در هر دقیقه ۲۱ دور می‌گردید. مقدار خلأ در کندانسور ۷۴۰ میلیمتر جیوه بود یعنی فشار درون آن، حدود ۲۰ میلیمتر جیوه بود. مکانیسمی که هال همواره در نظر داشت، مثل نمونه پیش و برخلاف وضع رایج کنونی، شامل لوله‌های بخاری می‌شد که آب سرد آنها را در میان می‌گرفت. این ماشین‌ساز از نظر قانونی سرپوشهای جداشونده‌ای را پیش‌بینی کرده بود تا بتواند به لوله‌ها برای تمیز کردن آنها دست یابد.

همان‌گونه که دیده‌ایم این نوع کاربرد در حدود سال ۱۸۴۷ کنار گذاشته شد. فرقت ۷۰۰ اسبی در سال ۱۸۵۲، بدون اینکه یکبار هم سفر واقعاً جدی داشته باشد درهم شکست.

در فرانسه در همان دوران، اشخاص مختلف بویژه آقای پکور، فقط یک منظور را تعقیب می‌کردند و به راههای گوناگون نمی‌رفتند. برای اینکه با کارهای پیرسن<sup>۱</sup> که در سال ۱۸۵۲ آغاز شده‌اند آشنا شویم باید به ممالک متحده آمریکا مراجعه کرد. او سیستم خاصی مشهور به کندانسور دو خلأی داشت. یکی کندانسور سطحی بود که همیشه با بخار درون لوله‌ها سروکار داشت، اما تنها یک تلمبه هم تخلیه آب مایع شده و هم جریان آب سرد را تأمین می‌کرد. شکی نیست (از جزئیات کار خبری نداریم) که این کار در پرتو کار مستقل هر دو رویه پیستون بوده است. مقدار فشار در هر دو ظرف، تقریباً برابر بود بنابراین، درزهای لوله‌ها فشار بسیار کمی متحمل می‌شدند و این امتیاز این مکانیسم بود. رواج این سیستم در ممالک متحده بسیار زیاد بود؛ نخست در کشتی *Alleghany* در ۱۸۵۲، سپس در دیگر کشتیهای اقیانوس‌پیمای نظیر *Adriatic* از کالینز با ماشینی که قدرتش به ۳۰۰۰ اسب می‌رسید. این همان سیستمی بود که در سال ۱۸۵۸ در ناوشکن فرانسه به نام *Mouette* کار گذاشته شد.

در واقع در همین سالها بود که فرانسه به این مسأله علاقه‌مند شد. در زمان جنگ کریمه تعدادی ناو که آب‌نشین آنها کم بود با ماشینهای پرفشار بدون کندانسور مجهز شده بودند. بعدها آنها بناچار برای جبران آب از کندانسورهای سطحی استفاده کردند.

کمی پیش از این تاریخ بود که دو ترمبله<sup>۲</sup> ماشینهای بخار مرکب را پیشنهاد کرد هر یک باید دو کندانسور سطحی داشته باشد. این قضیه که به سالهای ۱۸۵۲ - ۱۸۵۵ مربوط می‌شود از چند جهت مورد توجه قرار گرفت و در بسیاری از شوخیهای مربوط به یک «اختراع» عجیب و

غریب و کم‌وبیش معاصر ژولورن وارد شد. باید توجه داشت که ماشین‌سازان آن زمان از اطلاعات پایه‌ای ترمودینامیک، که بتازگی انتشار یافته بودند بکلی بی‌خبر بودند. وانگهی در همین زمان بود که در یاداری فرانسه فرصت یافت تا تجربیات عملی با کندانسورهای سطحی کسب کند.

ماشین بخار مرکب: (۱) یک ماشین معمولی با فشار ۲/۵ تا ۳ اتمسفر است. این ماشین در یک تبادُلگر حرارتی سطحی که اتر تبخیر می‌کند در ۶۰ درجه و ۵۳/۰ کیلوگرم فشار آب را بیرون می‌دهد. فشار بخار اتر در این دما به دو اتمسفر می‌رسد. آنچه را که امتیاز این ماشین گمان می‌کردند، چنین است. (۲) این بخار اتر، در یک ماشین پیستوندار، که روی همان محور ماشین قبلی قرار دارد کار می‌کند و اتر در تبادُلگر سطحی دومی که با آب دریا یا رودخانه خنک می‌شود با فشار ۲۸/۰ کیلوگرم مایع می‌گردد. بدین ترتیب، دیده می‌شود که دو کندانسور سطحی آبشار مانند وجود دارد که یکی بخار آب را مایع می‌کند و با اتر خنک می‌شود و دیگری بخار اتر را مایع می‌کند و با آب خنک می‌شود.

در سال ۱۸۵۲ نخستین آزمایشها در این مورد در ماریس برگذار شد و پس از آن ماشین بخار مرکب را روی تعدادی از کشتیهای بخاری شرکت آرنو-تواش<sup>۱</sup> و نیز شرکت تواژ<sup>۲</sup> رودخانه سن گذاشتند. این ماشین بخار، ۶۰٪ کل کار بازده داشت و ماشین اتری ۴۰٪ مانده را جبران می‌کرد. برای هر اسب محاسبه شده در ساعت ۱/۲۵ کیلوگرم زغال می‌سوزانید، که در آن زمان رقم خوبی بود. اما همه این مشخصات ثابت می‌کنند که این ماشین بدقت، مطالعه و بخوبی ساخته شده و نیز مصرف زغال آن بسیار مناسب بود. سطوح کندانسورها از یک ماشین معمولی بسیار بیشتر بود: ۸۰۰ متر مربع در ۱۰۰۰۰ لوله. ساختن آنها را می‌توان از افتخارات تکنیک شمرد و موجب پیشرفتی شد که روی صنعت آینده کندانسورهای سطحی تأثیر داشت. در مورد خود ماشینهای بخار مرکب باید گفت که آتش‌سوزیها آنها را بی‌اعتبار ساخت. با این همه، مقدار اتر موجود در کشتیها بسیار کم بود و مطمئناً خطر آن بسیار کمتر از خطر دهها تن بنزینی بود که هواپیماهای جدید با خود حمل می‌کنند. به هر تقدیر، دو ماشین ۷۰۰ اسبی که آقای کاوه در سال ۱۸۵۸ فراهم کرده بود تنها با بخار آب، و تبادُلگرهای حرارتی آنها با کندانسورهای سطحی کار می‌کردند و کار آنها بسیار منظم بود. دلیل اهمیت یافتن زیاد این قضیه، همین کاربرد کندانسور بود.

حدود سال ۱۸۶۰ آغاز دوران بیست ساله‌ای است که طی آن تکامل روزافزونی در این قسمت انجام گرفت. این سیستم از آن زمان به بعد کار می‌کرده است. پیگیری جزئیات کاربردها نه امکان و نه سودی دربر دارد. حدود سال ۱۸۶۰ در جهان آنگلوساکسون آقایان راون و هورتن دست به کار

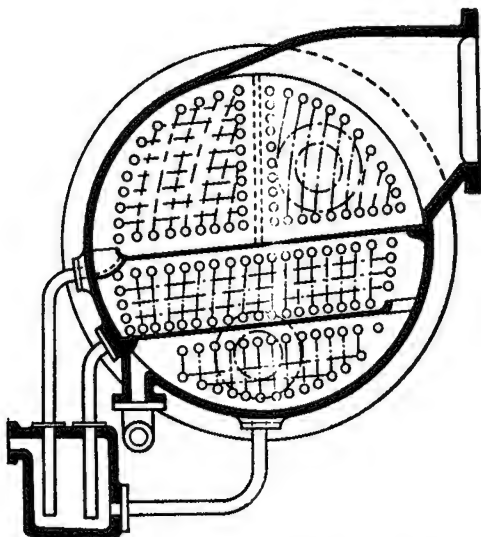


ساخت منظم تعدادی ماشین بخار پرفشار کشتی با کندانسور سطحی شدند. در سال ۱۸۶۱ در فرانسه بنژامن نورمن یک کندانسور سطحی روی ناو *Albert* نصب کرد. پس از این کار، دو یا سه نصب دیگر از همین نوع اجرا شد. خلاصه، از ۱۸۶۲ تا ۱۸۶۷ این سیستم گام به گام در کشتیها رواج یافت و با فشار زیاد کار می کرد، به طوری که می توان گفت که در سالهای ۱۸۷۰ تا ۱۸۷۵ کاربرد آن عمومی شد. به برکت وجود این سیستم از سال ۱۸۸۰ توانستند فشار کاری دیگ را با استفاده از ماشینهای چند انبساطی بالا برند. در جریان این دوره توسعه است که گذاشتن آب سرد در لوله ها، بدون اینکه بتوان مشخص ساخت که در کجا این رسم پایه گذاری شد، متداول گردید. درباره کندانسور با سطح خاکی، که گویا با ماشینهای پیستوندار همراه بود، باید گفت که بویژه در توربینها نقش مهمی داشته است.

در واقع بازده یک ماشین پیستوندار، چنانچه میزان خلأ سازی افزوده شود، کمی بالا می رود، اما در مورد توربینها وضع کاملاً تفاوت می کند. فرض کنیم ماشینیی با فشار متوسط سه کیلوگرم کار می کند. چنانچه میزان خلأ را از ۱/۰ کیلوگرم به ۵/۰ کیلوگرم بالا بریم تنها ۶۰٪ کار محاسبه شده را به دست خواهیم آورد. چرا؟ زیرا در یک ماشین پیستوندار، دتانت نمی تواند تا فشار کندانسور پیش برود. اما در توربینها، وضع کاملاً معکوس است. به همین دلیل پیدایش توربینها آغاز تحول تازه ای برای کندانسورها بود؛ تحولی برای دستیابی به خلأهای بیشتر از گذشته.

همچنین تکامل نیروگاههای حرارتی توربینی در زمانی که کندانسور بیش از هر چیز یک ضمیمه ماشینهای کشتی بود، سبب شد که این وسیله به تکاملی بسیار بالا دست یابد. با این حال، این را باید گفت که چیز زیادی برای تکامل کندانسور وجود نداشت، وسیله ای که تا آن زمان، جز اینکه ابعاد آن بسیار بزرگ شده بود، تغییر بنیادی نکرده بود. اما سطح خنک کننده باز هم از ردیفهایی از لوله ها تشکیل می شد که آب در آنها جریان می یافت (شکل ۷۲). در عوض می توان پیشرفتی در قدرت میعان دستگاه تشخیص داد. در سالهای ۱۸۷۰ - ۱۸۸۰ زمانی که این دستگاه در کشتیها رواج واقعی یافته بود، بسادگی سطحی برابر سطح دیگ بخار برای آن تعیین شد که قدرت میعان آن را از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم بخار در هر ساعت برای هر متر مربع بالا برد. حدود سال ۱۹۰۰ این رقم به ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم رسید و در سالهای میانی دو جنگ جهانی ۴۰ کیلوگرم شد.

هرچند که فاصله دماهایی که دستگاه بین آنها کار می کند کم باشد باید توجه داشت که کندانسور مقداری گرما دریافت می کند که حدود ۸۰٪ گرمایی است که دیگ بخار تهیه می کند. آب جاری در کندانسور با دمایی بیرون می رود که باز از دمای آب مایع شده کمتر است اما به طور کلی دستگاههای



شکل ۷۲. کندانسور سطحی جدید، مقطع عرضی.

بخار روی لوله‌هایی که آب سرد در آنها جریان دارد مایع می‌شود.

در این مقطع، ردیف لوله‌های آب دیده می‌شود (همه آنها رسم نشده‌اند). در بالا و سمت راست، سرپوش مخزن بخار (با خطوط بریده) دیده می‌شود. استوانه از سه محفظه روی هم ساخته شده است. بخار متراکم شده در هر یک از محفظه‌ها، از لوله‌های تخلیه جاری می‌شوند (پایین و چپ)؛ این لوله‌ها مربوط به دو پیچ و خم مایل (خطوط سیاه) و بخش پایینی استوانه می‌باشند. این مکانیسم دارای بیشترین بازده است.

سردکننده‌ای لازم است تا این مقدار گرمای هنگفت را در هوا رها سازد. دستگاه‌های سردکننده با آب جاری کار می‌کنند، یعنی شامل جریان هوایی هستند که در حین بالا رفتن دمایشان به حساب آب مقابل زیاد می‌شود؛ آب روی شبکه‌هایی می‌ریزد. سردکننده‌ها را تا مدت‌ها تماماً از چوب می‌ساختند. این شبکه‌ها اکنون به شکل برج‌های سیمانی بزرگ می‌باشند.

در پایان این فصل باید سخن کوتاهی هم درباره وسایل فرعی کندانسور داشته باشیم. وظایف این وسایل کاملاً اختصاصی است. تلمبه جریان آب سرد شرح چندانی نمی‌خواهد. طرز کار جداگانه بیرون کشیدن آب مایع شده و هوا تبدیل به یک قاعده شده است. وسایلی که بیش از بقیه به کار می‌روند نوعی تلمبه دوار برای آب و نیز وسایلی از نوع دم آبی یا تلمبه بخارپاش برای بیرون کردن هوا می‌باشند. این دستگاه‌ها خیلی کمتر از کندانسورهای قدیمی تزریقی، آب و هوا برای بیرون کشیدن دارند زیرا هر دو شار تنها از بخار مایع شده آمده‌اند، نه از آب خنک‌کننده.



## موتورهای هوایی

در اواخر سده هجدهم، پس از موفقیت‌هایی که ماشین بخارات به دست آورد، اندیشه جانشین کردن شاره دیگری مانند: الکل، اتر، جیوه و ... باد گرم به جای بخار، برای بهتر شدن بازده پیشنهاد شد. این موتور اساساً از دو استوانه تشکیل می‌شود که یکی گرم است و کوره‌ای دمای بالای آن را حفظ می‌کند، و دیگری سرد است و جریان هوا، دمای آن را پایین نگاه می‌دارد. یک تبادلگر حرارتی بین این دو استوانه گذاشته می‌شود. هوای گرم در استوانه گرم انبساط می‌یابد و به تبادلگر یا رزرناتور رانده می‌شود تا گرمای خود را به جریان هوای سردی که از محفظه دیگر آمده است واگذارد. هوایی که خنک شده است وارد استوانه خنک می‌شود در آنجا متراکم و به تبادلگر رانده می‌شود تا در آنجا گرم شود. این هوا به استوانه نخست برمی‌گردد و مقدار تازه‌ای گرما دریافت می‌کند و منبسط می‌گردد. این چرخه تکرار می‌شود.

در سال ۱۷۹۷ آقای جیمز گلایزبروک<sup>۱</sup> مهندس انگلیسی موتوری طرح کرد که می‌بایست به شکل زیر کار کند: هوا را متراکم سازد، بوسیله کوره‌ای در خارج، هوای متراکم را گرم کند و آن را در سیلندر موتوری براند تا با دانستی که متحمل می‌شود بتواند کار مفیدی انجام دهد. گلایزبروک

1. J. Glazebrook

همچنین پیشنهادی برای بازیابی گرمای گازهای خروجی از طریق بازگردانیدن آنها به کوره، ارائه داد. چرخه موتور استرلینگ: اما به هر حال، سال ۱۸۱۶ را سال پیدایش موتورهای (با چرخه) هوایی می‌دانند. در این سال آقای رابرت استرلینگ، کشیش اسکاتلندی یک موتور هوایی با مدار بسته را پیشنهاد کرد؛ طرح وی بر پایه چرخه‌ای استوار بود که به نام خود وی شناخته شد.

این مدار بسته فرضاً همان شاره موتور را باز به گردش می‌انداخت (خنک شدن، تراکم، گرم کردن دوباره، و دتانت) که به طور پیوسته و بدون ارتباط با خارج اجرا می‌شدند.

نخستین موتور قابل استفاده را آقای استرلینگ و برادر وی جیمز، تنها توانستند در سال ۱۸۴۴ یعنی پس از مدتها آزمایش که از سال ۱۸۱۸ آغاز شده بود، بسازند.

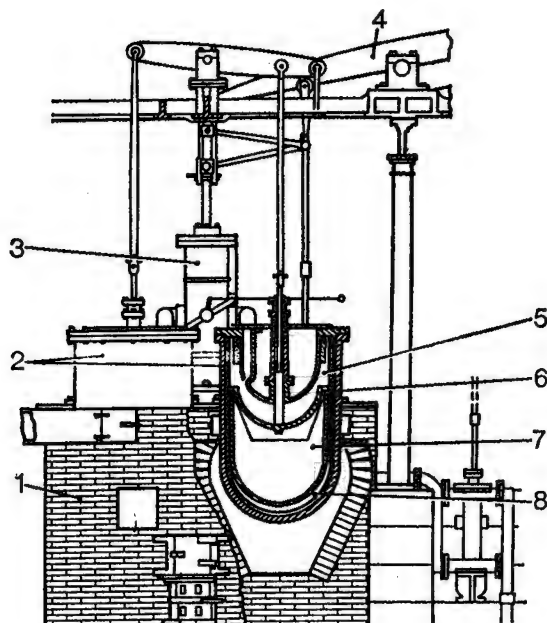
این موتور که بخصوص در ریخته‌گری داندی<sup>۱</sup> خدمت می‌کرد از یک استوانه موتور رفت و برگشتی و دو استوانه مولدهای گرم - که بتناوب کار می‌کردند - تشکیل می‌شد. در شکل ۷۳ مقطع یکی از این استوانه‌های مولد گرم و شکل خاص پیستونی که هوا را از محفظه سرد (قسمت بالایی استوانه) در محفظه گرم (قسمت پایینی) آنکه در بالای یک کوره قرار دارد می‌راند و متقابلاً یک حجم ثابت که مشخصه چرخه استرلینگ است دیده می‌شود. این استوانه حرکت‌دهنده از طریق دو سر خود متناوباً با محفظه گرم و محفظه سرد مرتبط می‌شود. پیستون موتور در اثر اختلاف فشار موجود با هریک از این دو محفظه‌ها فعال می‌شود. در شکل بالا همه اجزای ساختمانی که طبیعتاً از ماشین بخار با بازوی نوساندار اقتباس شده‌اند، دیده می‌شود.

اتلاف هوا در نتیجه کامل نبودن هواپندگی در مدار بسته بوسیله یک تلمبه جبران می‌شود. موتور استرلینگ ۲۱ اسب قدرت داشت و ۵۰ پوند زغال در ساعت مصرف می‌کرد.

چرخه موتور اریکسن: در ساخت موتورهای هوایی، پس از آقای استرلینگ، چهره درخشان دوم، ماشین‌ساز سوئدی تبار امریکا با نام جان اریکسن مقام دارد. او در سال ۱۸۲۶ موتور نخست خود را با کمربندهای جداگانه‌ای برای دوباره گرم کردن هوا و دیگری برای سرد کردن آن ساخت. این موتور بدون ژنراتور بود. اریکسن در سال ۱۸۳۳ نخستین اختراع خود را برای یک موتور دارای ژنراتور به ثبت رسانید.

نوآوری آقای اریکسن در پدید آوردن چرخه تازه‌ای از کارها بود و به همین جهت در سال ۱۸۵۱ امتیاز آن را به ثبت رسانید. چرخه آقای اریکسن نوعی چرخه باز، برای دوباره گرم‌سازی است که از طریق عبور هوا در رژنراتورهای با فشار ثابت عمل می‌کند.

در این چرخه باز، هوا از اتمسفر مکیده و در آن رانده می‌شود. عبور هوا در رژنراتور با فشار



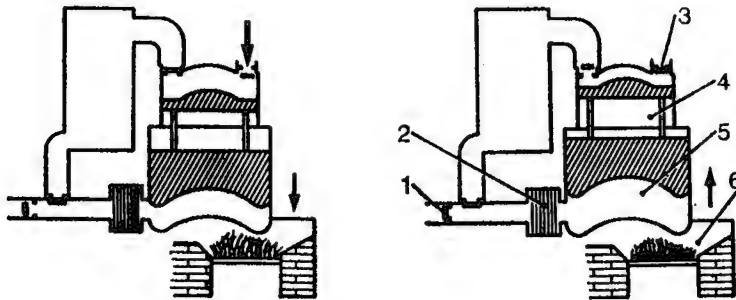
شکل ۷۳. موتور هوایی استرلینگ در ۱۸۴۴.

۱. کوره؛ ۲. سیلندرهای ژنراتور (دو عدد)؛ ۳. سیلندر حرکت دهنده ۴. شاهنگ (دسته پیستون موتور را با میل لنگ مرتبط می سازد)؛ ۵. محفظه سرد؛ ۶. ژنراتور؛ ۷. پیستون؛ ۸. محفظه گرم.

ثابت، نه با حجم ثابت، که در استرلینگ با آن برخورد کردیم، انجام می گیرد (شکل ۷۴). اریکسن نخست یک موتور ثابت با دو سیلندر حرکت دهنده ساخت، بعداً در ۱۸۵۲ موتوری با چهار سیلندر عمودی در یک راستا، برای نصب در کشتی بخاری اقیانوس پیمای اریکسن ساخت که در سال ۱۸۵۳ به آب انداخته شد. این موتور ۹ دور در دقیقه می گردید و گویا ۲۵۰ اسب قدرت داشت.

موتورهای کوچک با چرخه هوایی: اریکسن تنها کسی بود که چند موتور بزرگ ساخت که ماشینهای بخار، در بهترین دوران کار خود، نتوانستند جانشین آنها شوند. اما مکانیسین هایی که مدلهای گوناگونی از موتورهای کوچک هوایی ساختند متعدد بودند. در فرانسه می توان از این عده از مهندس معادن، بوردن (از سال ۱۸۳۶)، فرانشو<sup>۱</sup> (از سال ۱۸۳۸)، فارکو (۱۸۵۵)، لوپرو<sup>۲</sup> (۱۸۶۰)،

1. Franchot 2. Laubereau



شکل ۷۴. موتور هوایی اریکسن در ۱۸۵۲.

شکلها مربوط به هنگام ورود هوای جو و نیز هنگام حرکت می باشند.

۱. سوپاپ تخلیه هوا در جو؛ ۲. ژنراتور گرما؛ سوپاپ ورود هوای اتمسفر؛ ۴. سیلندر متراکم کننده هوا؛ ۵. سیلندر حرکت دهنده؛ ۶. کوره.

بلو<sup>۱</sup> (۱۸۶۰)، ژیرار (۱۸۶۷) نام برد؛ در اتریش از: لمان (۱۸۶۹)، هوکه<sup>۲</sup> (۱۸۷۸)؛ در ممالک متحده امریکا از: اریکسن (۱۸۲۶)، ویلکوکس (۱۸۶۳)، شاو (۱۸۶۷)، رایدِر<sup>۳</sup> (۱۸۷۸)؛ در انگلستان از: کیلی<sup>۴</sup> (۱۸۳۰) و براون (۱۸۸۶) نام برد.

فرانشو در سال ۱۸۵۳ اختراعی را به ثبت رسانید که در آن اجزای چرخه کاملی از نوع استرلینگ در یک سیلندر عملی می شد، به عبارت دیگر از یک سیلندر هم برای گرم و سرد کردن هوا و هم برای حرکت دادن دستگاه استفاده می کرد.

آقای لوپرو در سال ۱۸۶۰ موتوری ساخت که با مدار بسته کار می کرد، موتوری مشابه استرلینگ اما بدون ژنراتور خاص؛ و پیستون مولد باد تا حدودی این نقش را بر عهده داشت. موتور وی، همچنین یک سیلندر مولد هوای گرم و سرد داشت. هوای محفظه گرم در سیلندر گرم کننده هوا امکان رفتن به محفظه سرد را داشت و نیز عکس این قضیه به وسیله یک خلأ حلقه ای که بین جدار سیلندر و پیستون قرار داشت، انجام می شد. موتور لوپرو که چهارهنگامی بود با دو رفت کامل هر پیستون تکمیل شد. فشار درون موتور را یک سوپاپ مکشی، ثابت نگاه می داشت. این موتور برای قدرتهای کوچک تا یک اسب به کار می رفت و ۵۰۰ دور در دقیقه می گردید. این موتور در نمایشگاه سال ۱۸۶۷ پاریس عرضه شد.

موتور لمان در سال ۱۸۶۹ ساخته شد. این موتور هم بر پایه چرخه استرلینگ کار می کرد. این

موتور تنها یک سیلندر افقی داشت که یک سر آن را گرم و سر دیگر را سرد می‌کردند و درون آن، در انتهای سرد، یک پیستون حرکت‌دهنده قرار داشت و در انتهای گرم یک پیستون روبشی بود. هوا از محفظه گرم از زیر پیستون روبشی وارد محفظه سرد می‌شد. محفظه سرد، فضایی بین پیستون روبشی و پیستون حرکت‌دهنده بود. این موتور در نمایشگاه سال ۱۸۷۳ وین عرضه شد و حدود ۱۳۰ نمونه از آن طی دو سال برای صنایع کوچک آلمان ساخته شد.

آقای جان اریکسن پس از سال ۱۸۵۸ تعدادی موتور با چرخه هوایی طرح کرد که اکثراً در ممالک متحده آمریکا ساخته شدند و سالهای دراز هزاران نمونه از آنها فعال بودند. موتور وی دارای سیلندر افقی بود که از ۵/۰ تا ۲ اسب قدرت داشت و برپایه یک چرخه بازگرم‌سازی هوا کار می‌کرد.

علاوه بر موتورهایی که شرح آنها داده شد، نوع با مدار یا نوع با مدار باز همراه با رزناسیون، ماشین‌سازان متعدد، یک‌نوع موتور با مدار باز بدون گرم‌سازی دوباره هوا پیشنهاد کردند. چرخه کار طراحی شده آنها همان است که اکنون در توربینهای گازی دیده می‌شود.

این موتور از یک تلمبه متراکم‌کننده آدیاباتیکی (بیدرو) هوای جو تشکیل می‌شد. این تلمبه سپس هوا را بدون کمربندی می‌راند تا در آنجا بوسیله یک کویل گرمکن، در فشار ثابت گرم شود. این هوای گرم که در سیلندر حرکت‌دهنده وارد می‌شد متحمل دتانت گشته و مستقیماً در جو تخلیه می‌شد. این همان نوع موتوری است که جیمز گلکزبروک انگلیسی در سال ۱۷۹۷ پایه آن را گذارد. برای شناختن این موتور باید با کارهای جورج کیلی (۱۸۳۰)، بوردن (۱۸۳۶)، بلو (۱۸۶۰)، استفن ویلکوکس (۱۸۶۳)، شاو (۱۸۶۷)، هوکه (۱۸۷۸) و براون (۱۸۸۶)، آشنا بود.

آقای بلو در سال ۱۸۶۰ در اندیشه بود که به جای کویل گرمکن از ظرفی استفاده کند که اجاقی داشت که زغال روی آن بوسیله هوایی که تلمبه می‌دمید سرخ می‌شد. مخترعان دیگر که از آن جمله می‌توان از آقایان بنیه<sup>۱</sup> و ژانتی<sup>۲</sup> را نام برد کوره را درون خود سیلندر حرکت‌دهنده جا دادند و بدین ترتیب، موتور هوایی برونسوز را به موتور درونسوز تبدیل کردند.

آزمایشهای متعددی تا زمان در گرفتن جنگ جهانی اول ادامه داشتند اما این نوع موتور نتوانست در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. از نواقص عمده این موتورها، مقدار بازده و توان جرمی بسیار ناچیز آنها است و علت آن دشواری ساخت تبادلهای حرارتی شایسته در رزناتورها و دشواری روغنکاری سیلندر گرم و ... است.

اما گرچه اهمیت کاری موتورهای هوایی، تا حدود سال ۱۹۶۰، بسیار کم بود. فواید نظری



آن واجد اهمیت بود زیرا در پیشبرد و نظریهٔ ترمودینامیکی موتورهای سهیم است. مثلاً، تراکم قبلی گازها، خیلی پیشتر از آنکه در موتورهای درونسوز انجام شوند در این نوع موتورهای عملی شدند.

موتورهای جدید با چرخهٔ هوایی: در برههٔ ۱۸۱۸ تا ۱۸۳۸ موتورهای هوایی بکلی کنار گذاشته شدند؛ در این سالها شرکت فیلیپس در شهرهای آنته‌وون<sup>۱</sup> در هلند، یک برنامهٔ تحقیقاتی روی موتورهای نوع استرلینگ را آغاز کرد. این تحقیقات که در سال ۱۹۵۸ جنرال موتورز کورپوریشن در آن شرکت کرد در پرتو پیشرفتهای متالورژی و تکنیکهای نوین مربوط به انتقال گرما، به ساخت و راه انداختن پیش‌نمونه‌هایی انجامید که در قسمت قدرت جرمی و بازده می‌توانند با موتورهای درونسوز رقابت کنند.

آنها همچنین از لحاظ نرمی کار کردن، بی‌سروصدایی، دوام، نگهداری، امکان کاربرد سوختهای گوناگون، مانند انرژی هسته‌ای و خورشیدی، امکان کار کردن در هر محیطی: خلأ، آب و غیره مزایای متعددی دارند.

همان‌طور که چرخهٔ استرلینگ از لحاظ نظری دارای بازدهٔ ترمودینامیکی بسیار بیشتر از موتورهای درونسوز است، جابه‌جا کردن با استفاده از تبادلهای گرمایی، نزدیک شدن به نوعی تحول همدم را ممکن می‌سازد. راه‌حلهای سینماتیکی متعددی برای تحقق چرخهٔ استرلینگ به‌وسیله شرکت فیلیپس پذیرفته شدند: یک سیلندر رفت و برگشتی به‌شکل V، و غیره. حدود سال ۱۹۶۵ پیشرفته‌ترین موتور فیلیپس، دارای یک سیلندر بود که دو پیستون داشت: یک پیستون حرکت‌دهنده و یک پیستون روبشی؛ هر دو پیستون به دو میل‌لنگی با زاویه‌ای مناسب مربوط می‌شدند، آنها طوری جابه‌جا می‌شدند که گذر هوا را از طریق رزرتور در پایان هنگام حرکت و در پایان هنگام تراکم با حجم ثابت، ممکن سازند. دسته پیستون بالایی (روبنده) پیستون حرکت‌دهنده (پایینی) را در یک جعبهٔ آب‌بندی‌شده به پیش می‌راند. محفظهٔ گرم بین سر سیلندر و رخ بالایی پیستون روبنده است و محفظهٔ سرد، بین دو پیستون قرار دارد. یک چرخهٔ کامل (سرد شدن، تراکم، گرم کردن، دتانت) در دو رفت کامل هر پیستون اجرا می‌شد.

بازده چنین موتورهایی در دماهای کار ۸۰۰ درجه و ۱۵۰۰ دور در دقیقه به ۴۰٪ می‌رسید، و برای دماهای ۵۰۰ درجه‌ای، ۳۰٪ بود. قدرت این موتورهای می‌توانست تا ۵۰۰۰ اسب بالغ شود درحالی‌که حجم و وزن آنها برابر موتورهای دیزل بود.

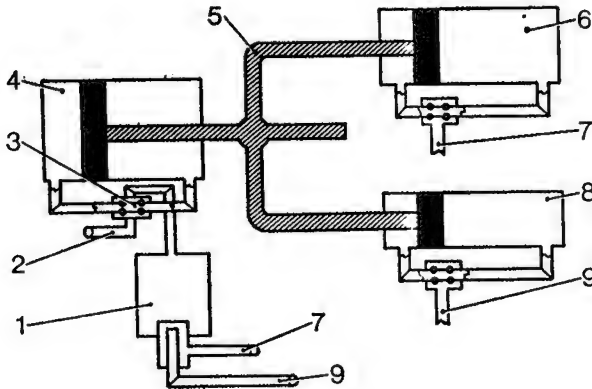
این نوع موتور در پرتو خصوصیات بی‌سروصدایی و نداشتن لرزش، در زیردریایها کاربرد بسیار مؤثری یافت. برای سفینه‌های فضایی این برتری را دارد که می‌تواند مدت‌ها کار کند و از انرژی

خورشیدی بهره جوید. این موتور همچنین در برخی تأسیسات ماشین‌کاری یا در تحقیقات مربوط به کیفیت بی‌سروصدایی، حداقل کار نگهداری، دوام و غیره به‌کار گرفته می‌شود. کاربرد آن برای حرکت دادن خودروهای زمینی، به‌علت مقدار فراوان آب مصرفی لازم برای خنک کردن هنوز پیشنهاد نشده است.



## موتورهای درونسوز

اختراع موتورهای درونسوز و گسترش صنعتی آنها، یکی از حوادث تکنیکی پایان سده نوزدهم است، حادثی که در شکل دادن ساختارهای تمدن نیمه دوم سده بیستم بیشترین سهم را دارند. اصطلاح درونسوز، ناظر به تفاوت این وسیله جدید تولید انرژی با ماشین بخار است که همه تمدن سده پیشین روی آن بنا شده بود. کوره و دیگ بخار که شاره حرکت دهنده در آن به وجود می آید، بیرون از سیلندر پیستوندار، یا همراه توربینها می باشند که انرژی برخاسته از انبساط بخار را گرفته و انتقال می دهند. در اینجا، برعکس، انبساط شاره حرکت دهنده - نتیجه سوختن در درون موتور است -، خصوصیتی که در همه موتورهای گوناگون درونسوز، اعم از پیستوندار یا بدون پیستون، که واکنشی هستند - موشک یا توربین - وجود دارد. در واقع، این جنبه دیگری از اصل درونسوزی است، که پس از گذراندن حدود یک سده دوره کمون تقریباً کلاسیک با داشتن سیلندر پیستوندار از نظر تکنیکی اشباع شده بود به تکنیکهای کاربردی دیگری راه یافت و فواید آن به طور کامل تجدید گردید. اما باید گفت که موتورهای کلاسیک پیستوندار، ماشینهای بخار متناوب را قبلاً به طور کامل از صحنه بکلی بیرون کرده بودند.



شکل ۷۵. موتور گازی فیلیپ لوبون، اختراع سال ۱۸۰۱.

۱: محفظه احتراق؛ ۲: خروج گازها؛ ۳: مقسم جریان برق؛ ۴: سیلندر حرکت؛ ۵: بازوهای یکپارچه اتصال دهنده سرپیستون؛ ۶: تلمبه هوا؛ ۷: مجرای هوا، بین تلمبه هوا و محفظه احتراق؛ ۸: تلمبه گاز؛ ۹: مجرای گاز، بین تلمبه گاز و محفظه احتراق.

### موتورهای پیستوندار

مراحل اولیه یک ابتکار: اگر بخواهیم تاریخ اختراع این وسیله را حدود سال ۱۸۶۰ تعیین کنیم، باید بدانیم که بسیار پیشتر از این زمان میل شدید به استفاده از احتراق در یک ظرف سربسته وسیله یک پیستون وجود داشته است.

آزمایشهای هوینگنس و پاپن (مجلد دوم، صفحه ۶۱۸)، و نیز کارهای ایزاک دوریواز (مجلد سوم، صفحه ۳۷۹) را به یاد آوریم. لازم است که نامهای کسان دیگری را هم به نامهای این پیشگامان افزود- کسانی که همگی در این کار با شکست روبه رو شدند. نخست با نام دو انگلیسی: جان باربر (در ۱۷۹۱) و رابرت استریت (در ۱۷۹۶) آشنا می شویم؛ آنگاه با فرانسویانی با نامهای: فیلیپ لوبون در ۱۸۰۱ (شکل ۷۵) و برادران نیپس (در ۱۸۰۶). کاملاً محتمل است که وسیله برادران نیپس با نام Pyréolophore ساخته و آزمایش شده اند، بعدها در این رشته، کوششها فزونی گرفت. پس از ویلیام سسیل که بی تردید در سال ۱۸۲۰ نوعی موتور جوئی (اتمسفیری) که با هیدروژن کار می کرد ساخت، سه سال بعد آقای سمیوئل براون یک موتورگازی طرح کرد. که آن هم اتمسفری بود، و برای کاربرد آن شرکتی تشکیل داد که گویا حدود ده سالی کارهای وی را دنبال می کرد. پس

از وی، امتیازات به ثبت رسیده و آزمایشهایی در ساخت به نام آقای سمیونل ماری<sup>۱</sup> در ۱۸۲۶، ویلیام رایت در ۱۸۳۳، ویلیام بارنت<sup>۲</sup> در ۱۸۳۸ وجود دارند.

اقدامات دیگری در برهه<sup>۳</sup> ۱۸۴۰ - ۱۸۶۰ انجام گرفته است. در امریکا آقای آلفرد دریک<sup>۴</sup> در ۱۸۴۳ دست به ساختن آن زد، اما تا ۱۸۵۵ آن را به ثبت نرسانید؛ کسانی از ایتالیا با نامهای برسانتی<sup>۵</sup> و ماتتوتچی<sup>۵</sup> ۱۸۵۳ - ۱۸۵۴ به ساخت آن اقدام کردند. موتور دریک، که پیش‌نمونه موتوری است که آقای لنوار در ۱۸۶۰ آن را ساخت، نوعی موتور دوهنگامه و دوطرفه است که با مخلوط هوا و گاز غیرفشرده روشنایی کار می‌کرد. بعدها گفته شد که ساخته وی از نوع موتور با عمل مستقیم (موتور معمولی) بوده است زیرا فشاری که روی پیستون وارد می‌شد تنها در نتیجه دتانت گازهایی گرم سوخته شده بود. برای نخستین بار در این موتور یک لوله چدنی که تا حد سرخی گرم می‌شد به‌کار رفته بود؛ این لوله را در میان مسیر پیستون می‌گذاشتند تا اشتعال را برانگیزد. با این روش با موقعیتهای دیگری نیز برخورد داریم. قدرت این موتور ۲۰ اسب بود و در هر دقیقه ۶۰ دور می‌گردید سرعتی که در آن زمان نسبتاً زیاد بود. موتور ساخت ایتالیاییها، که مربوط به ده سال بعد بود، پیش‌نمونه موتور اتمسفری شد که آقای ن. ا. اوتو در سال ۱۸۶۳ آن را ساخت.

سرانجام، کمی پیش از ساختهای نهایی، در سال ۱۸۵۸، آقای دوگران<sup>۶</sup> فرانسوی، یک موتور گازی را به نام خود به ثبت رسانید که در آن زمان طرح بسیار پیشرفته‌ای داشت.

آقای دوگران پس از بارنت دومین کسی است که استفاده از تراکم اولیه گاز را در نظر داشته است و همچون وی از اهمیت این کار غافل بوده است. هوا در آغاز هنگام تنفس، تنها از سوراخهایی وارد سیلندر می‌شد. سپس سوراخها مسدود می‌شدند و طی مدت نیمی از رفت پیستون، هوا تا حدود ۱/۲ فشرده می‌شد. در این لحظه، تلمبه‌ای گازی روشنایی را با همین فشار وارد سیلندر می‌ساخت و طی مدت بقیه رفت پیستون، مخلوط هوا و گاز فشرده‌تر می‌شدند. در هنگام دوم کار موتور، گازهای سوخته شده، با دتانت خود تولید کار مفید می‌کردند و حدود پایان رفت، تخلیه می‌شدند. در اینجا همه مکانیسم موتور دوهنگامه با فشرده‌سازی مقدماتی در داخل سیلندر، که پس از سال ۱۸۷۹ ساخته شد به چشم می‌خورد. اما تخلیه گازهای سوخته، چون تأمین نیست، کار موتور ناقص است. نخستین اطلاعات دوره کارهای آزمایشی که طی آن موتور درونسوز «اختراع شد اما کار نکرد» حدود سال ۱۸۶۰ به پایان رسید. این موتور درونسوز، چه از نظر ساخت و چه از لحاظ کار، در کنار همتای بزرگتر خود، ماشین بخار، قرار گرفت. طرح لوبون نمونه‌ای از شباهت

شگفتی آور این دو می باشد. اما در همان زمان از سوختهای دیگری هم استفاده شد و به سیستمها و راه حلهای تازه ای دست یافتند که در وهله نخست به سیستمهای کمکی ویژه موتورهای درونسوز مربوط می شد (سیستمهای اشتعال، خنک کردن، سوخترسانی).

موتور درونسوز، بدنه و مکانیسم حرکتی (سیلندر، پیستون، بازوی لنگ و غیره) و مکانیسم انتقال نیرو را از ماشین بخار اقتباس کرده است. مانند موتور جوی ساخته شده (۱). دوریواز، و. سسیل، س. براون، س. ماری، برسانتی - ماتوتچی) یا با مکانیسم عمل مستقیم یکطرفه یا دوطرفه (لوبون، و. رایت، و. بارت، ا. دریک، دوگران). چرخه کار آن دو هنگامی و بدون تراکم اولیه بود، گرچه آقایان بارت و دوگران از تراکم اولیه استفاده می کردند.

سوختهای گوناگونی - معمولاً گازی - آزمایش شدند: گاز روشنایی، هیدروژن و غیره. سوختهای مایع: ترانتین، الکل، هیدروکربورها نیز که پیدایش نخستین سوختها (کربوراتور) را سبب گردیدند (س. ماری) بررسی شدند. ورود هوا و سوخت در سیلندر یا به طور جداگانه انجام می گرفت یا همزمان با تنفس بوسیله تلمبه. انواع گوناگون اشتعال مورد آزمایش قرار گرفتند: اشتعال با برق (لوبون، ریواز، برسانتی - ماتوتچی)، با انتقال شعله، با لامپ ملتهب (دریک). این موتور در این زمان به سیستم خنک کننده آبی نیز مجهز بود: تلمبه هایی آب را در فضای اطراف سیلندرها می گردانیدند (س. براون و دیگران). ساخت چندین سیلندری نیز وجود داشت (س. براون) و نیز تنظیم سرعت بوسیله رگولاتور وات (رایت).

نقش تأخیری ترمودینامیک: همراه با این نخستین ماشینهای مخترعانی که کار خود را بر پایه آزمایش و بدون توجه به نظریه ترمودینامیک به پیش می بردند، ترمودینامیک نیز به عنوان دانشی نوین، بعدها در پیشرفت موتورهای درونسوز، نقش مؤثری داشت. در گذشته درباره کارهای سعدی کارنو که در سال ۱۸۲۴ منتشر شدند سخن گفته ایم (رجوع کنید به مجلد سوم صفحات ۱۱۷ و ۱۳۸ و نیز صفحه ۷۰ همین مجلد).

گرچه ترمودینامیک در سالهای ۱۸۶۰ به شاخه مستقلی از فیزیک تبدیل و به کار گرفته شد، در اینجا نخستین موتورهای درونسوز قابل استفاده ای که در سال ۱۸۶۰ ساخته شدند هیچ نقشی نداشته است. این موتورها را می توان دستاورد تجربیات ماشین سازان خودآموخته ای نظیر لنوار، اوتو، و دیگران دانست.

این گفته ها مغایر تأثیر بررسیهای نظری در ارتباط نزدیک با موتورهای درونسوز نیست. این بررسیها بخصوص پدیده های احتراق و به دست آوردن کار مفید را توضیح می دادند. فیزیکدانان

آلمانی از جمله آقایان: روبرت و. بونزن، بویژه فیزیکدان فرانسوی گوستاو آدولف هیرن توجه یافتند که کار مفید در یک موتور درونسوز انفجاری بر اثر دتانت گازهای سوخته به دست می آید؛ احتراق (یا انفجار) در مدت زمان بسیار کوتاهی، تقریباً در حجم ثابت انجام می گیرد. باید یادآور شد که لنوار گمان می برد که انفجار است که پیستون را در مرحله رفت حرکت دهنده جابه جا می کند و از تأثیر دتانت غافل بود.

جنبه مهم دیگری که آن هم به بررسیهای نظری این زمان مربوط می شود ایجاد و تجزیه و تحلیل چرخه های نوین طرز کار است - چرخه هایی که نتیجه کاربرد نظریه ترمودینامیک به نظر نمی رسیدند. پیدایش و تجزیه و تحلیل این چرخه ها تجربی ماندند و بر نوعی استنتاج منطقی عاری از هر پشتوانه ریاضی تکیه داشتند.

بر پایه همین نوع تحلیل تجربی بود که، مثلاً پس از سال ۱۸۶۰، همان طور که خواهیم دید، به اهمیت تراکم مقدماتی مخلوط سوخت در افزایش بازده موتور و یافتن وسایل تحقیق عملی آن پی بردند.

بررسیهای نظری و عملی. چرخه های ترمودینامیکی برای کاربرد آنها با کارهای ویلیام رنکین روی چرخه های ماشینهای بخار، منتشر در ۱۸۵۹ و نیز کارهای مهندس کارل ریترفون لینده<sup>۱</sup> - که در سال ۱۸۷۵، با ادعای اینکه چرخه کار ماشین سرمازای عکس چرخه کار ماشین بخار است، آن را ساخت - پیشرفت شایانی کرد.

در حدود سال ۱۸۸۰ نخستین نوشتارهای مربوط به موتورهای درونسوز در پایه گذاری نظریه مربوط به آنها و نیز ساخت سهم عمده ای داشت. از جمله این نوشتارها می توان از آثار آلمانیها ا. زالبی<sup>۲</sup>، ر. شوتلر<sup>۳</sup>، مورتیس شروتز<sup>۴</sup>، ر. دیزل، هوگو گولدنر<sup>۵</sup>؛ انگلیسیها: دوگلد کلرک<sup>۶</sup>، براین دانکین<sup>۷</sup>؛ از فرانسویان: امه ویتز و گوستاو ریشار و ... نام برد.

آقای رودلف دیزل، شاگرد لینده، نخستین کسی بود که پس از سال ۱۸۹۲، طی مدت آزمایشهای خود که به ساخت موتوری با نام خود وی انجامید، بر تحلیل ترمودینامیکی جدیدی - که گاهی هم بر خطا بود - برای توجیه طرز کار مورد نظر، تکیه می کرد. موتور دیزل را می توان نمونه درونسوز دانست که برای ساختن آن نکات ترمودینامیکی چرخه های انجام کار در نظر گرفته شده است.

هرچند که در حوالی سال ۱۹۰۵ همان طور که آقای ه. گولدنر اشاره می کند، هنوز هیچ نظریه

1. K.R.von Linde
2. A.Salby
3. R.Schöttler
4. M.Schroter
5. H.Guldner
6. D.Clerk
7. B.Donkin



ترمودینامیکی برای فهم موتور، به طور کامل شکل نگرفته بود، از آغاز سده بیستم، ترمودینامیک به یک سلاح نظری مؤثر برای سازندگان این وسیله تبدیل شد. برپایه ترمودینامیک بود که محاسبات چرخه‌های کار موتورهای طرح شده و رسیدن به حداکثر بازده و حداقل ابعاد برای بعضی کاربردها و نیز تحلیل گرمایی کار موتورهای موجود انجام می‌گرفت.

## موتورهای گازی

نخستین موتورهای درونسوزی که به کار گرفته شدند ساخته سال ۱۸۶۰ بودند. این سال مبداء تاریخ این موتورها به عنوان منابع انرژی است. این موتورهای نخستین کاربردی بر پایه چرخه موتورهای پیشین - دوهنگامی بدون تراکم مقدماتی - عمل می‌کردند، و مانند پیشینیان خود، موتورهای «انفجاری» نامیده می‌شدند زیرا عمل احتراق در آنها تقریباً در حجم ثابت و در مدت زمان بسیار کوتاهی پس از ورود کامل مخلوط احتراق در سیلندر، انجام می‌گرفت. باید توجه کرد که اصطلاح «انفجاری» بکلی نابجاست و احتراق گازها در سیلندر، نوعی واکنش شدید است که سرعت آن به طور محسوسی کمتر از سرعت انفجاری است.

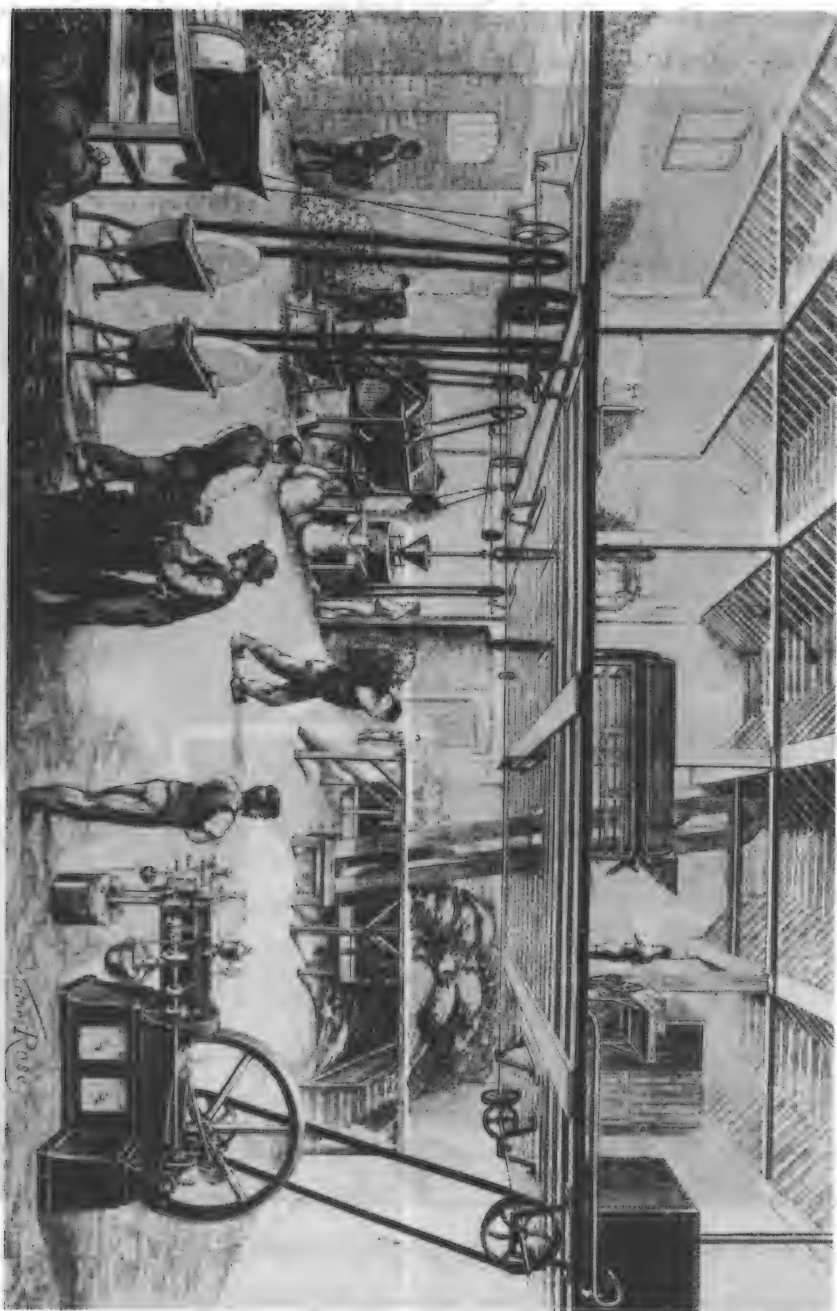
نخستین سوختی که در آغاز به کار گرفته شد، گاز روشنایی بود. فراورده‌های نفتی به علت تولید صنعتی بسیار کم آنها هنوز زیاد شناخته شده نبودند.

اینکه آزمایشهای قبلی تا چه اندازه به ساخت موتورهای اولیه کمک بوده‌اند کار دشواری است. چنین می‌نماید که یکی از این سازندگان با نام اوگون<sup>۱</sup>، که مدیر شرکت پارسی گاز سیلندری بود از کارهای پیشینیان در این مورد اطلاع کامل داشت و می‌توان پذیرفت که اطلاعات ژوزف اتین لنوار از وی بسیار کمتر بود. با این همه این لنوار بود که تقریباً به تنهایی، به کمک ویژگیها نبوغ مانند خود به نتایج رضایتبخشی رسید.

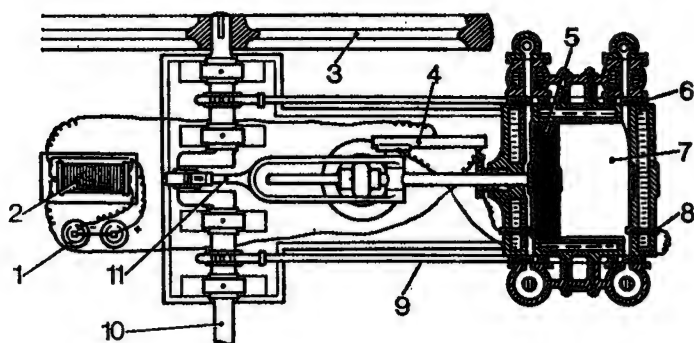
آقای لنوار که تبار بلژیکی داشت، بدون هیچ مطالعه قبلی در زمینه این موتورها، در سالهای ۱۸۵۰ با چند اختراع در زمینه الکتریسیته و مکانیک، نام خود را در ردیف مخترعان به ثبت رسانید و این امر بدون شک سبب شد که به چند کارگاه ماشین‌سازی رفت و آمد داشته باشد. بویژه کارگاههای لوفورو برادران روار<sup>۲</sup> حدود سال ۱۸۶۰ محل جمع شدن گروه‌های تکنسین و دانشمندانی بودند که مشکلاتی که با آنها برخورد شده بود در آنجاها مطرح و اطلاعات مبادله می‌شدند. هانری روار شاگرد قدیم اکول پلی تکنیک، نقاش روشن‌بین، که کارهای خود را بعداً با امپرسیونیستها به نمایش گذارد، احتمالاً برای کسانی نظیر لنوار مشاور قابل اعتمادی بود.



تابوی ۷. توربین بخارکشتی، نوع پارسنز (۱۹۱۴).



تابلوی ۸. تأسیسات کشاورزی، که به موتور گازی مجهز شده است (حدود ۱۸۸۰).



شکل ۷۶. موتور لنوار (۱۸۶۰).

۱: پیل الکتریکی؛ ۲: قرقره القا؛ ۳: چرخ طیار؛ ۴: مقسم جریان برق؛ ۵: پیستون؛ ۶: کشوی توزیع (ورود و خروج)؛ ۷: سیلندر حرکت؛ ۸: شمع؛ ۹: میل فرمان کشوی توزیع؛ ۱۰: محور حرکت دهنده؛ ۱۱: شاتون.

لنوار و موتورهای دوهنگامی با عمل مستقیم و دوطرفه: به هر تقدیر آقای لنوار توانست با ترکیب اجزای شناخته شده، نخستین موتور درونسوز قابل استفاده را بسازد.

امه ویتز می‌نویسد «می‌توانند کاملاً بدرستی به ما ثابت کنند که تا پیش از سال ۱۸۶۰ هیچ ماشین گازی نتوانسته بود در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. چنین موتوری اختراع شده بود اما بایست کار می‌کرد، و این امر مدیون شایستگی آقای لنوار است». لنوار در ۲۴ ژانویه ۱۸۶۰ اختراع «موتوری که در اثر سوختن گازها هوای آن منبسط می‌شود» را در فرانسه به ثبت رسانید؛ چند ماه بعد موتور وی در کارگاهی در پاریس کار می‌کرد (شکل ۷۶).

موتور وی از نوع مستقیم (موتور معمولی) و دوطرفه بود که بر پایه چرخه دوهنگامی و بدون تراکم قبلی کار می‌کرد. در هنگام نخست، مخلوط هوا و گاز در نیمه نخست رفت پیستون، به داخل سیلندر مکیده می‌شد؛ با بسته شدن تنفس، جرقه یک شمع الکتریکی، مخلوط را مشتعل می‌ساخت. فشار پس از احتراق به ۵ یا ۶ اتمسفر می‌رسید و در نیمه دوم رفت پیستون، گازهای سوخته شده دست‌خوش دثانت شده و کار مفیدی انجام می‌دادند. در هنگام دوم طی تمام مدت رفت پیستون، گازها بیرون رانده می‌شدند. کار موتور را می‌شد بوسیله نمودار تعقیب کرد. نخستین نمونه این موتور را بی‌شبهه آقای ماریونی، ماشین‌ساز فرانسوی ساخته است. اما کارگاه لوفور-روار و نیز کارگاه گوتیه و شرکا لا اقل از سال ۱۸۶۱ به ساختن آن اشتغال داشتند.

بدنه، مکانیسم موتور (سیلندر، پیستون، محور حرکت دهنده) مشابه اجزای ماشین بخار افقی

دوطرفه بودند. توزیع بوسیله کشویی انجام می‌گرفت که لنگهایی متصل به محور حرکت‌دهنده آن را فعال می‌کرد. اختلاط هوا و گاز در کانالی انجام می‌گرفت که به سیلندر راه داشت. سیستم اشتعال الکتریکی اختراعی لنوار بسیار پیشرفته بود و اصول کار سیستمهای کنونی اشتعال الکتریکی بوسیله باتری رعایت می‌شد. این سیستم از دو جزء پیلهای بونزن یک قرقره القا و یک مقسم جریان با ولتاژ بالا تشکیل می‌شد. شمعها از یک مهره مسی قلاویز شده که یک میله چینی عایق از میان آن می‌گذشت ساخته شده بودند. سیمی هادی در دل میله چینی گذاشته شده بود. شمعها را در هر انتهای سیلندر محکم می‌کردند.

کار خنک کردن که بسیار جدی بود بوسیله آبی که جریان آزاد داشت تأمین می‌شد. گازهای سوخته شده بخصوص حرکت کشوی خروج گاز را، با وجود روغنکاری زیاد آن، مختل می‌ساخت. در مدل‌های بزرگ نیز بوسیله کشوی خروج دود، کمی آب در سیلندر افشاندن می‌شد تا دمای گازهای سوخته شده، کاهش یابد.

موتور لنوار را تا قدرت ۱۲ اسب ساخته‌اند. این موتور حدود سه مترمکعب برای هر اسب در ساعت مصرف داشت بارده مؤثر آن حداکثر به ۴/۶٪ رسید. تنظیم سرعت را در ابتدا با بازو بسته کردن شیر گاز با دست انجام می‌دادند. اما آقای ماریوننی توانست ورود گاز به سیلندر را با نوعی رگولاتور مرکزگریز به‌طور خودکار تنظیم کند.

موتور لنوار به‌عنوان جانشین ماشین بخار کم قدرت، در تعدادی صنایع کوچک که نیاز به یک منبع انرژی بینابینی با قدرت متوسط در آنها احساس می‌شد، موفقیت خوبی داشت. از بین رفتن فضاگیری زیاد دیگ بخار، امکان قراردادن این موتور در همه‌جا بدون شرایط خاص، بویژه این واقعیت که سوخت، تنها در زمان کار موتور مصرف می‌شد از علل استقبال از آن بودند. در فرانسه در سال ۱۸۶۵ حدود ۴۰۰ موتور لنوار به‌کار مشغول بودند و در انگلستان حدود ۱۰۰۰ دستگاه آن.

موفقیت موتور لنوار سبب شد که مغزهای فنی متعددی برای تکمیل موتورهای درونسوز فعال شوند. اوگون در سال ۱۸۵۸ پیش از لنوار موتوری ساخته بود که تقریباً مشابه ماشین لنوار بود، اما او این کار را رها کرد تا اینکه به ساخت موتورهای جوی (اتمسفری) پرداخت. پس از موفقیت موتور لنوار، او نیز حدود سال ۱۸۶۴ به ساخت موتورهای دوطرفه روی آورد.

وی در ابتدای کار، یک موتور عمودی را منظور داشت، اما پس از سال ۱۸۷۷ بنوع افقی آن روی کرد. او با در نظر داشتن نارسانیهای ماشین لنوار، چند اصلاح در طرز کار این موتور

اعمال کرد. مخلوط گاز سوختی، دیگر مکیده نمی‌شد، بلکه تلمبه‌ای آن را به‌درون سیلندر می‌راند تا تغییرات فشار که در شرایط توزیع پدید می‌آیند اختلالی در کار موتور ایجاد نکنند. در اینجا هم مانند موتورهای بزرگ لنوار، در سیلندر، آب تزریق می‌کردند تا دمای گازهای خروجی پایین آید، اما این تزریق پیش از مرحله اشتعال انجام می‌گرفت و بدین ترتیب فشار بخار بر فشار گازهای سوخته شده افزوده می‌شد، اما در بازده موتور تأثیر واقعی نداشت.

ورود و خروج گاز بوسیله یک کشو انجام می‌گرفت تا تبادل دما بین گازهای گرم سوخته شده و مخلوط گازهای تازه تأمین شده باشد. آقای اوگون همچنین به‌جای اشتعال الکتریکی که ناگیریهایی متواتر داشت نوعی اشتعال با شعله را که مطمئنتر بود جانشین کرد.

موتور اوگون، گرچه از لحاظ طرز کار و مصرف گاز و نفت بر موتور لنوار برتری داشت، رواجی نیافت. چنین می‌نماید که اوگون می‌خواست خودش از آن استفاده کند و منابع کافی در دسترس وی نبوده است.

موتورهای دیگری هم با عمل مستقیم اما یکطرفه، در سالهای بعد ساخته شدند که از آن میان می‌توان از موتور بنیه، فوره<sup>۱</sup> و اکونومیک موتور ساخت امریکا، موتورهای انگلیسی کیندر و کینزی<sup>۲</sup> و موتور یولیوس هوک<sup>۳</sup> نام برد. ماشین اخیر در سال ۱۸۷۳ در وین ساخته شد و تنها موتوری بود که بنزین مصرف می‌کرد، اما استقبال از آن زیاد نبود. ماشین‌سازانی، از جمله لنوار که کارگاهی برای خود برپا کرده بود، در سال ۱۸۶۲ از بنزین استفاده کردند اما موفقیتی نیافتند.

همه این موتورها، قدرت کمی داشتند؛ ساده و زمخت بودند و ساعتها بدون نیاز به مراقبت کار می‌کردند، بهای گزافی نداشتند اما مصرف آنها خانه خراب‌کن بود، لااقل ۲۵۰۰ لیتر گاز برای هر اسب در ساعت، در موتورهای لنوار و اوگون.

اوتو و موتورهای اتمسفری (جوی): انواع دیگری از موتورهای دو هنگامی بدون تراکم مقدماتی، پس از موفقیتی که موتور لنوار به‌دست آورد، ساخته شدند. از میان مشهورترین این موتورها، موتور اتمسفری دارای پیستون پرنده بود که آقایان اوتو و ا. لاتگن<sup>۴</sup> آلمانی آن را ساختند.

نیکلاتوس اوگوست اوتو که یک آژانس مسافرتی داشت، پس از ساخت موتور لنوار از کار خود دست کشید تا وقت خود را وقف ساخت موتورهای درونسوز کند. در سال ۱۸۶۱ آزمایشهایی روی یک موتور لنوار انجام داد، آزمایشهایی که منجر به کاربرد اصل طرز کار چهار هنگامی با تراکم مقدماتی شد که درباره آن باز سخن خواهیم گفت. اما اوتو که سرعت متوجه ارزش کشف خود نشده بود این میدان را در پایان سال ۱۸۶۲ ترک کرد و مطابق نمونه برسانتی و ماتوتچی در سال

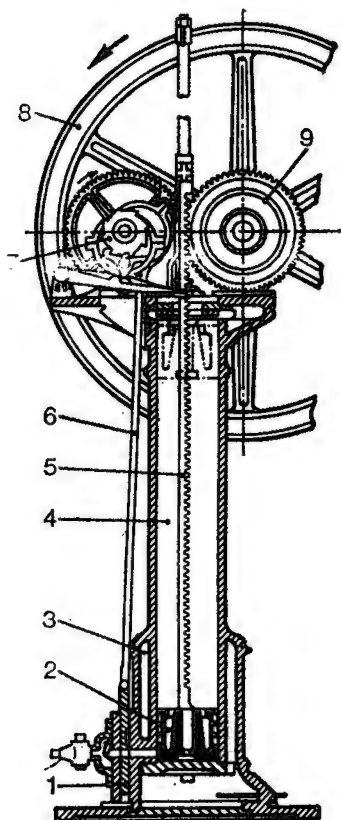
۱۸۶۳ نوعی موتورگازی ساخت که طبق اصل ماشینهای بخار اتمسفری کار می‌کرد. خنک شدن گازهای سوختی سبب کاهش فشار در سیلندر می‌شد و کار موتور نتیجهٔ پس زدن پیستون در اثر فشار جو بود.

اوتو در سال ۱۸۶۴ با مهندس یوگن لانگن شریک شد. آنها پس از بررسی انواعی از موتورهای اتمسفری که تفاوت زیادی با یکدیگر داشتند به مدلی دست یافتند که آن را در نمایشگاه پاریس سال ۱۸۶۷ به نمایش گذاشتند و با استقبال فراوانی روبه‌رو شد. این موتور برای تولید یک اسب قدرت در هر ساعت، تنها ۸۰۰ لیتر می‌سوزانید درحالی‌که موتور لنوار ۲۵۰۰ لیتر. این صرفه‌جویی با پیشراندن دتانت گازهای سوخته شده، طی رفت سر بالای پیستون، تا پایین فشار جو به دست آمد. پیستون که با فشار جو به پایین رانده می‌شد با میلهٔ دنده‌دار دستهٔ خود، چرخنده‌ای را می‌گردانید که با یک مکانیسم جغجغه‌ای روی محور حرکت‌دهنده سوار شده بود، این چرخنده در هنگام نخست، خلاص می‌شد. گردش این محور را یک چرخ طیار نظم می‌داد. توزیع را کشوانجام می‌داد و اشتعال را یک شعله. موتور را یک پوشش آب خنک می‌کرد (شکل ۷۷).

کارگاه اوتو و شرکا، که از سال ۱۸۷۲ با نام Gasmotoren Fabrik Deutz A.G. خوانده می‌شد مدلها گوناگونی از ۵/۰ تا ۳ اسب از این موتور را ساخت. این موتور برای همهٔ کارهایی که بین ۱۸۶۰ - ۱۸۷۶ ایجاد شدند با وجود سروصدای وحشتناک مربوط به‌کار پیستون پرنده و جغجغهٔ میل دنده بسیار مناسب بود. اما کار پرسروصدا و نامنظم، رونق آن را از بین برد و ماشین‌سازان نیز از ساخت آن چشم پوشیدند.

موتور اتمسفری دیگری در همان زمان بوسیلهٔ آقایان رایتان<sup>۱</sup> و آیمولر<sup>۲</sup> ساخته‌شد که سالهای ۱۸۶۷ - ۱۸۷۳ در مونیخ در کارگاه مخترع خود کار می‌کرد. می‌بایست پیشگامان این آقایان را در ساخت موتورهای چهارهنگامی که در سال ۱۸۷۳ نمونه‌ای از آن را ساختند، نیز یادآور شد.

موتورهای «مختلط»: با ترکیب ماهرانهٔ شاتون بازگشتی یا پیستونهای متقابل در سیلندر، چند ماشین‌ساز توانستند از انبساط گازهای سوخته شده و فشار جو، برای تولید کار مفید بهره بگیرند. در نخستین نوع آنها، موتور بیشاپ<sup>۳</sup> بسیار پرآوازه شد؛ حتی اکنون نیز چون نمونه‌هایی از آن در موزه‌های تکنیک نگهداری می‌شوند، شناخته شده هستند. این موتور در سال ۱۸۷۰ ساخته شد. شاتون بازگشتی امکان می‌دهد که طی هنگام اول یک ضربه حرکت‌دهنده - مانند موتور لنوار - به دست آید و نیز ضربه حرکت‌دهندهٔ دیگری در نتیجه تأثیر فشار جو در جریان حرکت به پایین پیستون ایجاد شود (شکل ۷۸). در آن زمان بدرستی آن را موتور مختلط می‌نامیدند زیرا نوعی موتور



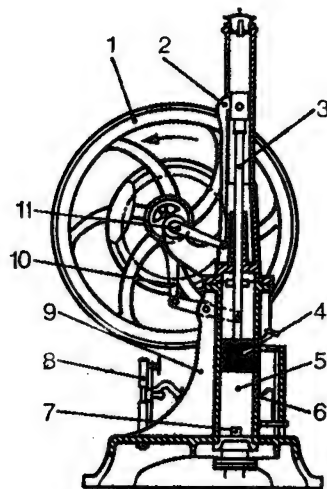
شکل ۷۷. موتور اتمسفری اوتو- لانگن (۱۸۶۷).

۱: کشوی توزیع؛ ۲: پیستون حرکت دهنده؛ ۳: سیستم خنک شدن با آب؛ ۴: سیلندر حرکت دهنده؛ ۵: میله دنده دار؛ ۶: میل فرمان کشوی توزیع؛ ۷: مکانیسم جغجغه ای؛ ۸: چرخ طیار؛ ۹: چرخ دنده.

دو طرفه بود که مشخصات ویژه خود را داشت. از امتیازات بزرگ آن بی نیازی به روغنکاری داخل سیلندر بود. احتمالاً این نخستین موتور دارای پره های بیرونی، برای خنک شدن با هوا می باشد. این موتور را آقایان مینیون<sup>۱</sup> و رورار ساختند و ظاهراً مدت پانزده سال کار کرد. باید توجه داد بیشتر موتورهایی که از آنها به عنوان موتورهای با عمل مستقیم، یکطرفه، بدون تراکم قبلی سخن رفته است در نوشتارهای آن زمان تحت عنوان موتورهای مختلط از نوع بیشاپ آمده اند.

1. Mignon





شکل ۷۸. موتور «مختلط» بیشاپ (۱۸۷۲).

۱: چرخ‌طیار؛ ۲: شاتون؛ ۳: میل پیستون؛ ۴: پیستون؛ ۵: سیلندر؛ ۶: روزنه اشتعال؛ ۷: روزنه ورود سوخت و تخلیه گازهای سوخته شده؛ ۸: شیر کنترل مقدار ورود گازهای سوختنی؛ ۹: ماهیچه‌های خنک‌کننده؛ ۱۰: میل فرمان کشوی توزیع؛ ۱۱: بازو.

پیستونهای متقابل در یک سیلندر را آقای گیلز<sup>۱</sup> برای موتوری که در آلمان کارگاه Maschinen Austadt Humbolt ساخت در نظر گرفت و آقای ل. سایمون<sup>۲</sup> آن را به سال ۱۸۷۵ در انگلستان ساخت. محفظه احتراق بین دو پیستون قرار داشت که یکی، پیستون بالایی بود با طرز شبیه آنچه که در موتور اتمسفری اوتو وجود داشت؛ و دیگری پیستون پایینی بود که چرخه دو هنگام با عمل مستقیم را، که در آن زمان معمول بود، همراه با کار یکطرفه انجام می‌داد. همه موتورهایی که از آنها سخن گفته‌ایم، زمخت و نسبتاً با صرفه بودند و از یک تا سه اسب قدرت داشتند؛ گرچه قدرت بعضی از آنها تا ۱۲ اسب هم می‌رسید.

احتمالاً در پرتو همین موتورهاست که موتورگازی در سالهای ۶۰ در کارگاههای کوچک راه یافت. در این دوره تا اندازه‌ای شروع به معاوضه آنها با ماشینهای بخار شد. آنها این امتیاز را داشتند که بمحض نصب راه‌اندازی می‌شدند. این موتورها سوخت لازم برای تولید بخار را، در شروع کار و زمان توقف، پایین آوردند. حذف دیگ بخار، که دست‌وپاگیر و در بعضی از شهرهای بزرگ نصب

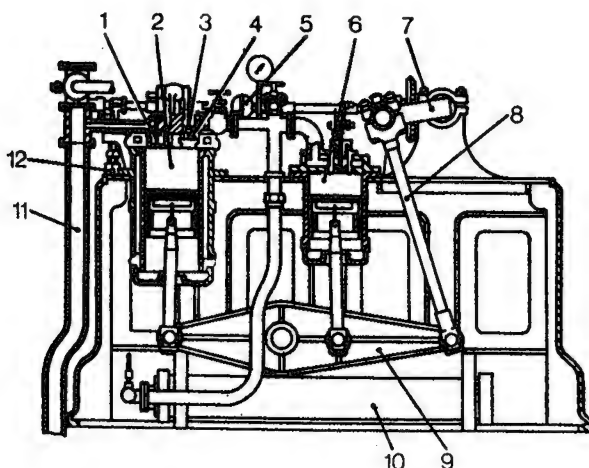
1. Gilles 2. L. Simon

آن مستلزم کسب پروانه بود، موفقیتی محسوب می‌شد. این تجربه حاصل شد که ماشین بخار را نمی‌توان بدون جانشین دانست و از انرژی گرمایی مواد سوختنی با احتراق آنها در داخل سیلندر بهتر می‌توان استفاده کرد. همهٔ این موتورهای درونسوز، بدون تراکم مقدماتی تا سال ۱۸۹۰ در صنایع کوچک به‌کار گرفته می‌شدند. از آن پس موتورهای به‌اصطلاح با تراکم مقدماتی برای همیشه به‌جای آنها نشستند. کوشش در راه تکمیل این نوع موتور روی بهتر شدن بازده آن تمرکز یافت، بنابراین مصرف سوخت که در ابتدا یأس‌آور بود، پایین آمد. برای کوچک کردن حجم، افزایش قدرت و گسترش میدان کاربرد آن کوشش شد. برای دستیابی به هدف نخست به تراکم مخلوط گازها قبل از اشتعال آنها «تراکم قبلی» روی آوردند. و نیز بعداً در جریان تحول موتورهای درونسوز، افزایش میزان تراکم از هدف‌های - اگر نه مهمترین - مهم بود و آن را در تلاش برای بالا بردن بازده موتور عامل اصلی به حساب می‌آوردند.

مشکل تراکم قبلی: در ثبت اختراعات آقایان ویلیام بارنت و دوگران مسأله تراکم مقدماتی آمده است. اما این موتورها به‌طور صنعتی مورد استفاده قرار نگرفتند و نقش این تراکم در کار موتور در آن زمان فهمیده نشد.

چنین می‌نماید که اولین تکنسینی که بوضوح این کار را توصیه کرده، گوستاواشمیت است. وی در سخنرانی خود به تاریخ ۱۸۱۶ در انستیتوی پلی‌تکنیک وین، برای بهتر شدن بازده موتور لنوار، توصیه کرد که مخلوط هوای سرد و گاز را بوسیلهٔ تلمبه‌هایی، پیش از آنکه وارد سیلندر شوند تا حدود سه اتمسفر متراکم سازند. این فکر را بدون شبهه برای نخستین بار آقای فرانسوا میلیون<sup>۱</sup> فرانسوی مشخص و معین ساخت و آن را در سال ۱۸۶۱ در انگلستان به ثبت رسانید. موتوری که آقای میلیون طرح آن را ارائه می‌داد از نوع دو هنگامی بود، مخلوط گازی با دو تلمبه متراکم و با فشار وارد سیلندر می‌شد. اطلاعاتی در دست نیست که این موتور ساخته شد یا نه.

موتورهای بریتون: آقای بریتون، ماشین‌ساز امریکایی در سالهای ۱۸۷۲ - ۱۸۷۳ اختراعات متعددی را به ثبت رسانید و برپایهٔ آنها در سال ۱۸۷۳ موتوری ساخت که برای نخستین بار در نمایشگاه سال ۱۸۷۳ وین آن را به نمایش گذارد. این اولین موتوری بود که واقعاً با تراکم مقدماتی مخلوط گازها کار می‌کرد و آگاهانه برای بهتر کردن بازده به‌کار گرفته شده بود و به‌همین دلیل با اینکه یک موتور انفجاری نیست آن را در اینجا مورد بحث قرار می‌دهیم. این موتوری دو هنگامی بود که در هنگام نخست، مخلوط سوختی متراکم شده با یک تلمبه، وارد سیلندر می‌شد و طی مدت رفت یک چهارم اول حرکت پیستون تا زمان بسته شدن سوپاپ ورود گاز، با فشار ثابت می‌سوخت.



شکل ۷۹. موتور بریتون (۱۸۷۳).

۱: سوپاپ خروج گازها؛ ۲: سیلندر حرکت؛ ۳: سوپاپ ورود سوخت؛ ۴: کاربوراتور؛ ۵: رگولاتور مرکزگریز؛ ۶: تلمبه هوا؛ ۷: بازو؛ ۸: شاتون؛ ۹: شاهنگ؛ ۱۰: مخزن هوا؛ ۱۱: خروج گازها؛ ۱۲: تلمبه سوخت.

بعداً این مخلوط در سه چهارم باقی مانده مسیر دست خوش دتانت می شد. در هنگام دوم، گازهای سوخته شده بیرون رانده می شدند.

نخستین موتور بریتون برای کار کردن با سوخته های گازی طرحریزی شده بود. این موتور تلمبه ای داشت که پیستون آن بوسیله شاهنگی که حرکت پیستون سیلندر را هم تأمین می کرد به کار می افتاد. این تلمبه، مخلوط هوا-گاز (۱۲ تا ۱۵٪ گاز) را تا ۵ اتمسفر متراکم می ساخت، سپس آن را در اواخر حرکت رو به پایین پیستون، وارد سیلندر می کرد.

اما این گاز پس از چند حادثه انفجار کنار گذاشته شد و آقای بریتون موتور خود را برای مصرف بنزین دستکاری کرد. بنابراین وی نخستین کسی بود که فکر استفاده از سوخت مایع را مطرح ساخت (شکل ۷۹). تلمبه دستگاه تنها هوا را تحت فشار قرار می داد و هوا در گذر خود، به هنگام ورود به سیلندر یا گاز بنزین آغشته می شد. کپسولی از ورق مشبک آهن که نمدی آغشته به مایع در آن بود سیلندر این موتور بود. تلمبه کوچک کمکی این «کاربوراتور» اولیه را تغذیه می کرد. این تفصیلات بعدها پدید آمدند. اشتعال مخلوط سوختی با شعله انجام می گرفت.

مشخصه دیگری از موتور بریتون، طرز احتراق آن است که در فشار ثابت انجام می گیرد. حدود

بیست سال بعد این نوع احتراق، مشخصه اصلی موتورهای دیزل شد. بدین ترتیب موتور بریتون را می‌توان سلف موتور دیزل دانست. بعدها در این باره سخن خواهیم گفت.

گرچه چند مؤسسه اجازه ساخت آن را دریافت داشتند اما موتور بریتون عمر کوتاهی داشت. خود آقای بریتون در سال ۱۸۸۲ ساخت آن را رها کرد و دست به کار ساختن موتورهای چهار زمانه شد.

کارهای اولیه موتورهای چهارهنگامی: طی سالهای ۶۰ موتورهای گازی به واقعیتی تبدیل شدند و اصولی از طرز کار آنها به دست آمد. باین حال، شرط اصلی بهتر شدن بازده، تراکم قبلی، هنوز درک نشده بود. همه موتورها به طور دو زمانه کار می‌کردند، یعنی با رفتن و بازگشت پیستون در سیلندر، یک چرخه، کامل می‌شد.

براساس این دستاوردها، حرکت برای عملی کردن تراکم قبلی، راه بسیار پرپیچ و خمی را دنبال کرد. این امر نشان می‌دهد که همه بررسیها را عملاً تجربه‌گران انجام داده‌اند و برای یافتن راه رسیدن به مقصد، هیچ‌گونه نظریه‌ای آنان را راهنمایی نمی‌کرد. آنان به ساقیه هوش تند و کارشناسی خود عمل می‌کردند و با کوشش و تحمل دشواریهای فراوان به راه حل رضایتبخشی دست یافتند.

این راه حل همانا موتور چهارهنگامی بود که عملی کردن تراکم قبلی را الزام‌آور می‌ساخت. موتورهای چهارزمانه با دوبار رفت و برگشت پیستون در سیلندر ساخته شده‌اند که طی آن اجرای پیاپی ورود مخلوط گازی، تراکم آن، اشتعال و دانت، تخلیه گازهای سوخته شده وجود دارد. باید توجه داد که تجربه‌گران و از آن میان نیکلاؤس آوگوست اوتو که نخستین سازنده چنین موتوری برای صنعت بود، این نتیجه را به دست آوردند که باید موتوری ساخت که از انواع قبلی بسیار متفاوت باشد درحالی که آنها می‌توانستند با دستکاری کمی، موتور دوهنگامی را که با آن بسیار انس داشتند با منظور خود منطبق سازند. موتور دوهنگامی با تراکم قبلی، از موتورهای چهارهنگامی - با قلب اختراع اولیه اوتو - نتیجه شده است.

اوتو و موتور چهارهنگامی: تکامل موتور اوتو هم با نوساناتی همراه بود. اوتو در همان آزمایشهای اولیه خود در سال ۱۸۶۱ روی موتور کوچک لئوار، نه تنها به مشتعل ساختن مخلوط در پایان مسیر رفت، دست یافت بلکه توانست مخلوط سوختی را که جذب پیستون شده بود در مسیر دیگری (فشار) متراکم، و آن را تنها در پایان این مسیر منفجر سازد. راه پیشرفت به سوی چرخه چهارهنگامی بدین ترتیب باز شده بود و آقای اوتو که از نتایج به دست آمده دلگرم شده بود در سال ۱۸۶۲ بوسیله مکانیسین میکائیل یوزف تسونس<sup>۱</sup> موتوری ساخت که در نوشتارهای تخصصی به

نام «موتور چهارهنگامی آزمایشی اوتو ۱۸۶۲» معرفی شده است. از این ماشین تنها طرحی از سال ۱۸۸۵ در دست است که به‌مناسبت دادگاهی دربارهٔ حق امتیاز اوتو تهیه شده است. این موتور گویا چهار سیلندر یکطرفه، دوبه‌دو مقابل هم، داشته است. اوتو بر آن بود که از چرخهٔ چهارهنگامی استفاده کند اما پیش‌بینی‌های وی تأیید نشدند و موتور بزودی در اثر لرزش‌هایی که به‌هنگام کار داشت خرد شد. انفجار مخلوط سوختی بسیار شدید بود و سیستم اشتعال نیز که پیستون آن را کنترل می‌کرد و نقطه اشتعال را بسیار تغییر می‌داد آن را شدت می‌بخشید. بدین ترتیب، اوتو این میدان را خالی کرد تا همان‌طور که دیدیم، موتور اتمسفری بسازد.

نخستین موتور چهارهنگامی که می‌توانست کار کند، به توسط ساعت‌سازی آلمانی با نام مونیخ کریستیان رایتیمان در سال ۱۸۷۳ ساخته شد. این موتور مدت هشت سال در کارگاه وی برای راه انداختن ماشینهای کوچک مته و فرز فعال بود. موتور وی بدون نقشهٔ معین، به‌طور تجربی، با قطعات زیاد (سیلندر، کُشو)ی که از موتور اتمسفری ساختهٔ آیمولر و خود وی در سال ۱۸۶۷ به‌جای مانده بود ساخته شد. این موتور گازی بود و توزیع‌کشویی داشت مجهز به سوپاپ و اشتعال با شعله بود. طی نخستین ثلث مسیر ورود سوخت، پیستون صرفاً هوا را، سپس در دوسوم باقی‌مانده، مخلوط را می‌مکید. این موتور با ۲۰۰ دور در دقیقه قدرتی برابر  $\frac{3}{4}$  اسب داشت. سرعت آن با دست بوسیلهٔ شیر گاز تنظیم می‌شد.

موتور رایتیمان تا زمان دادگاه پرسروصدای سال ۱۸۸۳، که مربوط به چرخهٔ چهارهنگامی بود، شهرتی نداشت.

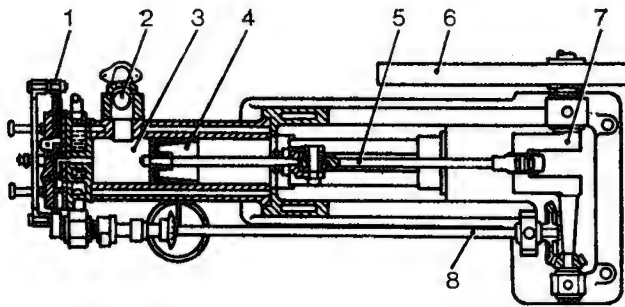
با این‌همه، پس از موفقیت‌های اولیه‌اش با موتور اتمسفری، اوتو از نو به مسألهٔ کاربرد تراکم مقدماتی، که احتمالاً آن را رها نکرده بود بازگشت. وی کوشید تا از مشاهدات سال ۱۸۶۲ استفاده کند و مدت ده سال در پی محدود کردن انتشار انفجار با نگهداری بخش ماندهٔ گازهای سوخته شده، طی مدت دتانت، در سیلندر بود. او کوشید تا دربارهٔ لایه‌بندی گازها در داخل سیلندر، از یک مخلوط غنی در نزدیکی نقطهٔ اشتعال تا یک گاز ناسوختنی در نزدیکی پیستون، نوعی تئوری سرهمبندی کند. بدین ترتیب، احتراق باید کند می‌شد و این امر نقص انفجار بسیار سریع را از بین می‌برد و حرکت منظم موتور را تأمین می‌کرد. هرچند این نظریه غلط بود اما ساخت موتور نوین با چرخه چهارهنگامی در اواخر سال ۱۸۷۵ یا اوایل ۱۸۷۶ به‌کمک فرانتس رینگس<sup>۱</sup> تحقق پذیرفت. بنابراین، می‌توان گفت که از راه تجربه بود که اوتو به موتور چهارهنگامی رسید و ساخت آن هدف نخست وی نبود.

در آغاز ماه مارس ۱۸۷۶ نخستین موتور اوتو برای آزمایش آماده بود. این موتور نیای همه موتورهای درونسوز چهارهنگامی است. این موتور از نظر مکانیکی بدون عیب نبود و دلیل آن هم مدت بسیار کوتاهی بود که برای ساختن آن در نظر گرفته شده بود. این یک موتور افقی یکطرفه با شاتونی مفصلی بود که مستقیم روی مهره پیستون وصل می شد. ورود گاز و هوا بوسیله کشو انجام می گرفت و گازهای سوخته شده از راه سوپاپی بیرون رانده می شدند. هم کشو و هم سوپاپ را، محور توزیع، کنترل می کرد. اشتعال گازها با شعله متواتری که در کشو ایجاد می شد انجام می گرفت و یک شعله دائم مطابق سیستم بارنت آن را منظم از نو مشتعل می ساخت. این موتور با آب خنک می شد. گاز و هوا بین دو تا سه اتمسفر فشرده می شدند و حداکثر فشار حدود ۱۰ اتمسفر بود. قطر سیلندر ۱۶۱ میلیمتر و طول رفت پیستون ۳۰۰ میلیمتر بود. قدرت موتور سه اسب با ۱۸۰ دور در دقیقه و مقدار مصرف آن در هر ساعت برای هر اسب ۹۵۰ کیلوگرم بود. تنظیم این موتور با دست بوسیله شیر انجام می گرفت که مقدار گاز وارد به سیلندر را کنترل می کرد.

موتور اول اوتو بزودی از لحاظ مکانیکی بوسیله ویلهلم مایباح<sup>۱</sup> طبق مدل یک ماشین بخار افقی روز، اصلاح شد (شکل ۸۰). شاتون مفصلی که مستقیم به پیستون وصل می شد جای خود را به میله ای دارای سر غلبنه و ناودانی داد. تنظیم کار ماشین به طور خودکار با استفاده از رگولاتور وات انجام می گرفت. نتایج کار بسیار دلگرم کننده بود. مصرف گاز این مدل جدید تقریباً برابر مقدار مصرف موتور اتمسفری اوتو- لانگن سال ۱۸۷۶ شد که با صرفه ترین موتور بود؛ اما سروصدای بسیار کمتری داشت. کار آن منظم و حجم آن بسیار کمتر و بازده آن بیشتر بود.

آقای اوتو در پنجم ژوئن ۱۸۷۶ تقاضای ثبت اختراع خود را کرد، اما از آنجا که ثبت اختراع تا ۲۵ ماه مه سال ۱۸۷۷ در آلمان وجود نداشت، امتیاز اوتو در تاریخ چهارم اوت ۱۸۷۷ به ثبت رسید. این کار سبب شد که انحصار موتور چهارهنگامی برای مدت پانزده سال، تا ۱۸۹۱ در دست مؤسسه دویتس باقی بماند و این امتیاز چند سال بعد انگیزه دادگاههایی شد که تاریخی ماندند. چرخه نظری بو دو روشا درباره موتور چهارهنگامی: در حقیقت در سال ۱۸۶۲ بود که یک مهندس فرانسوی راه آهن به نام آلفونس بو دو روشا رساله ای با عنوان: *Nouvelles recherches sur les conditions pratiques de l'utilisation de la chaleur et en général de la force motrice* منتشر کرد که طی آن در ضمن ارائه راه حل های دیگری از کاربرد بهتر گرما در موتورهای حرارتی، برای یافتن بهترین شرایط کاری موتورهای درونسوز نیز پیشنهادهایی داد.

او علت های اتلاف حرارتی از طریق جدار و خروج گازها را تشخیص داد و برای کاهش آنها



شکل ۸۰. موتور چهارهنگامی اوتو (۱۸۷۶).

۱. کشوی ورود سوخت و اشتعال؛ ۲. سوپاپ تخلیه؛ ۳. سیلندر؛ ۴. پیستون؛ ۵. شاتون؛ ۶. چرخ طیار؛ ۷. محور حرکت دهنده؛ ۸. میل فرمان کشوی توزیع.

راه‌حلهایی پیشنهاد کرد. یکی از این راه‌حلهای که مربوط به اتلاف گرما در اثر خروج گاز است ایجاد مرحله داناتی هرچه طولانیتر را پیشنهاد می‌کند. او با استدلال منطقی بدین نتیجه می‌رسد که چنانچه بخواهند مقدار فشار را در پایان رفت حرکت دهنده تا حد ممکن پایین آورند، همین نتیجه را می‌توان با بالا بردن هرچه بیشتر فشار در آغاز همین حرکت به دست آورد. وی همچنین توصیه می‌کند که مقدار فشار در آغاز این حرکت، حتی تا  $5/5 - 6/5$  اتمسفر بالا رود، مقداری که از نظر وی، اشتعال خودبه‌خودی را سبب می‌شود. آقای بو دو روشا بدین طریق به مفهوم کار موتور با تراکم قبلی دست یافت و آن را ابتدا: «دانت گرمایی که پس از تراکم سرمایی به دست می‌آید» نامید. اما وی نه تنها طرز کار موتورهای درونسوز با تراکم قبلی را پایه گذارد، بلکه همچنین وسیله تحقق آن: چرخه چهارهنگامی را پیشنهاد کرد: «در این صورت و برای یک جانب سیلندر، طبیعتاً به اجرای عملیات زیر در دوره‌ای از چهار مرحله پشت سر هم راهنمایی شدند:

«۱°، تنفس، طی یک رفت کامل پیستون»

«۲°، تراکم، طی مرحله بعدی»

«۳°، اشتعال در نقطه مرگ و دانت طی مرحله سوم»

«۴°، بیرون راندن گازهای سوخته شده در مرحله چهارم و بازگشت پایانی»

متأسفانه آقای بو دو روشا که با مجتمع روار رفت و آمد داشت شخصیتی گمنام بود و احتمال زیاد دارد که اشخاصی که با وی ملاقات می‌کردند او را شخصی تخیلی می‌انگاشتند و رساله وی

را بدون شک هیچ‌کسی که می‌توانست از آن سودی ببرد نخواند. بخصوص او می‌توانست اوتو را از ۱۵ سال تجربیات کورکورانه معاف سازد، زیرا می‌توانست اهمیت راه‌حلی را که از کنار آن گذشته بود به وی نشان دهد. اما خود بود دو روشا تنها به تئوری می‌پرداخت و هرگز به کمترین کار عملی علاقه‌مند نبود.

با این‌همه، رساله‌ی وی در نقطه مقابل اختراع اوتو بود زیرا اوتو به‌عنوان مثال نشان داده بود که چرخه چهارهنگامی آینده احتراق درونی را تجدید کرده است.

مرحله گسترش: نمایشگاه جهانی پاریس در ۱۸۷۸ ویژه موفقیت‌های موتورهای چهارهنگامی بود. پروانه ساخت این موتور را انگلیسیان، فرانسویان و امریکایی‌ها به‌دست آوردند، و ساخت آن سرعت گسترش یافت. نمونه‌ای که مایباخ ساخت یک سیلندر افقی داشت و نخستین اقتباس از آن بود. قدرت این موتورها از  $\frac{1}{4}$  تا ۳ اسب متغیر بود. بعدها در سال ۱۸۸۰ موتورهایی با ۱۵ تا ۲۰ اسب ساخته شد و با بزرگتر شدن ابعاد موتور، در سال ۱۸۸۹ موتوری با قدرت ۱۰۰ اسب ساخته شد. بدین‌ترتیب عصر موتورهای گازی پر قدرت آغاز شد.

در همان‌حال، راه‌حلهای دیگری مورد بررسی قرار گرفتند و به مرحله ساخت رسیدند. در سال ۱۸۷۹ دویتس تعدادی موتورهای دو سیلندری ساخت که در آنها دسته‌های پیستون به میل‌لنگ یک محور متصل بودند.

موتورهای دو سیلندری بسیار قویتر از موتورهای تک سیلندری بودند، کار آنها چنان منظم بود که در کارخانه‌ها بهتر از مولدهای الکتریکی، که گسترش آنها هم شروع شده بود، به‌کار می‌آمدند. برپایه اندیشه‌ای از گوتلیب دایملر که در آن زمان در دویتس کار می‌کرد برای ساختن یک موتور مختلط، با الهام از ماشینهای بخار دو انبساطی آزمایشهایی به عمل آمد. این اقدام را چند تکنسین نیز دنبال کردند، و فرنان فوره مدت زیادی دنبال نشد.

رقبای اوتو از سال ۱۸۸۲ امتیازات وی را مورد تعرض قرار دادند. به همین مناسبت پیشگامانی نظیر میلیون، دوگران، رایتمان، بو دو روشا و دیگرانی که احتمالاً مدتها گمنام بودند شناخته شدند. در ژانویه ۱۸۸۶ دادگاهی اوتو را از امتیازاتش درباره موتورهای چهارهنگامی در همه کشورها، جز انگلستان محروم ساخت. این تصمیم، هیچ‌یک از صلاحیتهای اوتو - را که بدون اطلاع از کارهای پیشینیان، که در برابر او قرار می‌دادند، موفق شده بود - نمی‌توانست منکر شود.

حتی پیش از آنکه قضاوت به عمل آید، موتورهای دیگری از نوع چهارهنگامی، بویژه در فرانسه، ساخته شدند. آقای لنوار بوسیله مینیون و روار در سال ۱۸۸۳ یک موتور افقی با توزیع بوسیله



سوپاپهای مکانیکی ساخت که بسیار با صرفه بود: ۶۰۰ لیتر برای هر اسب در ساعت. اکثر راه‌حلهایی که برای موتور سال ۱۸۶۰ به‌کار گرفته شدند بوسیلهٔ این شخص اقتباس شدند: رگولاتور وات، اشتعال الکتریکی و خنک شدن با آب. این موتور لنوار که بعداً با دو و سپس با چهار سیلندر ساخته شد، به جایی رسید که با بنزین کار می‌کرد.

نوآوری دیگری که می‌توان آن را از نظر سادگی و عملی بودن، پیشرفتی به‌شمار آورد، در همان زمان با نام موتور *Simplex* به بازار آمد. طراحان این موتور آقایان دلامار-دبوت ویل و شارل مالاندن<sup>۱</sup> و سازندهٔ آن تامس پاول اهل روان بود. این هم موتوری افقی و تک سیلندری بود که ورود سوخت در سیلندر بوسیله کشویی انجام می‌گرفت که اشتعال هم در آن با یک جرعهٔ الکتریکی ایجاد می‌شد؛ فرار گاز از یک سوپاپ بود. موتور *Simplex* در زمان خود نقشی ایفا کرد و کسانی که آزمایشهای اولیهٔ ساخت اتومبیل را انجام می‌دادند با آن کار می‌کردند، و نیز قدرت آن به‌عنوان موتور صنعتی در سال ۱۸۸۹ به ۱۰۰ اسب رسید.

همین‌که به بطلان امتیاز اوتو رأی داده شد، نوع موتورهای چهارهنگامی بسرعت رواج گرفت. این رواج به‌حساب کنار گذاشتن موتورهای دوهنگامی با یا بدون تراکم قبلی در مرحلهٔ پیش بود که هنوز طرفدارانی داشت. این نکته جالب است که زیاده‌روی در این راه بدانجا کشید که موتورهای شش‌هنگامی پیشنهاد شدند و اولین آنها را گرiffin انگلیسی در ۱۸۸۳ ساخت. دو هنگام آخر این موتور برای رویدن تکمیلی هوای آزاد سیلندر بود. این پیشنهاد با پیشنهاد اوتو که ده سال پیش ارائه شده بود مقابل شد و چنانکه دیدیم، مربوط به تنظیم فرار گاز برای حفظ بخش باقی مانده گازهای سوخته سیلندر بود. راه‌حلهای مکانیکی با کنترل شدن شدت انفجار بهبود یافتند؛ اما بازده این سیستم یأس‌آور بود و بزودی کنار گذاشته شد.

اصلاحات گوناگون: یکی از نخستین اصلاحاتی که انجام گرفت عمودی قرار دادن سیلندرها بود. در آلمان، برادران کورتینگ<sup>۲</sup>، آدم و شرکت بوس-زومبارت<sup>۳</sup> و شرکا نوعی موتورهای عمودی ساختند که محور اصلی (یا راه‌انداز) در بالای سیلندرها قرار داشت. در همگی این موتورها عمل توزیع با سوپاپهایی انجام می‌گرفت و اشتعال آنها با شعله. در انگلستان برادران کراسلی<sup>۴</sup> همین سیستم را پذیرفتند اما اشتعال با لامپ ملتهب انجام می‌گرفت. در فرانسه، شرکت پاریسی گاز از اشتعال الکتریکی استفاده می‌کرد.

طرز قرار گرفتن محور اصلی (راه‌انداز) در زیر سیلندرها، به‌شکل ماشینهای هاونی بخار را در

1. Ch. Malandin 2. Körting 3. Buss-Sombart 4. Crossley

سال ۱۸۸۸ آقای فرنان فوره در فرانسه پذیرفت و آقای بورس لوتزکی<sup>۱</sup> مهندس روسی در آلمان. سیستم پیستونهای متقابل در سیلندر که در آن زمان ویژه موتورهای دوهنگامی بدون تراکم قبلی بود در سال ۱۸۷۵ بوسیله فردیناند کیندرمان آلمانی برای موتوری از نوع چهارهنگامی به کار گرفته شد. در انگلستان آقای ویلیام دکسفورد<sup>۲</sup> و پسران آتکینسون<sup>۳</sup> در ۱۸۸۱ پیستونهای متقابل را برای موتورهای چهارهنگامی به ثبت رسانیدند. آقای فوره در سال ۱۸۸۵ همین سیستم را با چندین راه حل سینماتیک برای انتقال حرکت از پیستونها، که در جهات مخالف جابه جا می شدند، به کار گرفت: تجهیز با شاتون جفتی بیرونی در ۱۸۸۵، فرمان مستقیم یکی از پیستونها و فرمان با بازوهای بیرونی پیستون در ۱۸۸۶، میل لنگ تکی با دو دسته (یا زبانه) و کنترل پیستون با اهرم نوساندار در ۱۸۸۷. فوره در واقع بدون اینکه چیز تازه ای اختراع کرده باشد نامش در ردیف مخترعان بسیار فعال فهرست شده است.

با تمام این احوال، کاربرد پیستونهای متقابل پیگیری نشد؛ اما چون تعادل کاملی بر آن حکومت می کرد بعدها برای موتورهای دوهنگامی که شامل بعضی موتورهای گازی بسیار قدرتمند می شدند و پس از سال ۱۹۳۰ برای موتورهای دیزل از نو به کار برده شد.

دو طرفه ساختن هم موضوع آزمایشهای فراوانی در انگلستان بوسیله گریفین روی موتور شش هنگامی در ۱۸۸۶، سپس در سال پس از آن در فرانسه بوسیله لوتونب<sup>۴</sup> روی موتور چهارهنگامی بود. اما دو طرفه کار کردن موتور مدتی بعد، روی موتورهای گازی قدرتمند و پس از آن روی موتور دیزل پذیرفته شد.

دو باره طرز توزیع، شاهد سوپاپهایی بودند که شانه به شانه کشو رواج می یافتند. زمانی که سرعت کار شروع به افزایش کرد سوپاپهای تنفسی و خروج گاز ناگزیر هر دو خودکار شدند.

سیستمهای گوناگون اشتغال نیز، به طوری که دیدیم، به کار گرفته شدند. پس از سال ۱۸۸۶ در روش اشتغال با شعله اصلاحی وارد شد و آن استفاده از لامپ برقی در محل ورود گاز به جای سیستم کشویی بود. نخستین لامپ اشتغال را آقای کورتینگ آلمانی طرح کرد. اشتغال بوسیله لامپ ملتهب چنین بود که مخلوط سوختی در پایان مرحله تراکم، با واسطه توزیعی که از لامپ واقع در بالای سیلندر فرمان می گیرد با آن برخورد می کند. در سال ۱۸۸۳ دایملر این سیستم را کنار گذاشت و لامپ ملتهب را در تماس دائم با داخل سیلندر قرار داد. اصلاحات اخیر مربوط به افزایش یافتن سرعت موتورها نیز می شد.

روش گذشته خنک سازی با آب این عیب را داشت که مصرف آب آن زیاد: ۳۰ تا ۴۰ لیتر

در هر ساعت برای هر اسب بود. اما این روش از این پس با جریان دادن آب در چرخه بسته‌ای انجام گرفت.

در موتورهای دو سیلندری و ندرتاً چهار سیلندری که ابعاد و قدرت آنها، بسرعت طی ده سال، فزونی بسیار یافت، راه‌اندازی آنها با دشواریهایی روبه‌رو بود. راه‌اندازی آنها با گردانیدن جرم لخت با دست انجام می‌گرفت. اوتو برای سبک کردن این کار وسیله‌ای اندیشید که حذف تراکم را تا نخستین اشتعال ممکن می‌ساخت. اما این راه‌حل برای موتورهای با قدرت کمی بیشتر مناسب نبود. آقای دوگلد کلرک در سال ۱۸۸۳ وسیله‌ای برای نگهداری گازهای متراکم در دور آخر موتور در لحظه توقف را در یک مخزن کمکی یافت. از این گازهای تحت فشار برای راندن پیستون در راه‌اندازی بعدی استفاده شد. در این راه‌حل، کاربرد پرهزینه یک موتور کوچک کمکی حذف می‌شد اما نگهداری مخلوط متراکم شده خطر انفجار را به همراه داشت. بدین ترتیب، یک تلمبه کوچک دستی را برای ایجاد این تراکم در لحظه راه‌اندازی، مورد استفاده قرار دادند.

برای بالا بردن بازده موتور با تمدید دتانت گازهای سوخته شده در سیلندر، آزمایشهایی به عمل آمد. آقای شارون<sup>۱</sup> وسیله‌ای را مورد استفاده قرار داد که گازهای سوخته شده را از نو وارد چرخه می‌کرد و در چرخه بعدی از آن کار می‌کشید، و آقای آتکینسون کوشید تا بوسیله تنظیم شاتونها، طولهای دتانت دوگانه مرحله تراکم، بازده را بالا برد. چرخه‌های دتانت مدید در این زمان مدنظر بودند گر چه فایده آنها در زمانی بسیار بعد، آن‌هم برای موتورهای با سوخت‌رسانی زیاد بوسیله کمپرسورهای توربینی یا برای گروه موتورهای پیستونی با توربین گازی واکنشی آشکار شد.

در پایان یادآوری می‌کنیم که در این دوره گازسازهایی برای گاز پست و گاز آب رواج یافته بودند (رجوع کنید به صفحه ۶۲۲)؛ این وضع طبیعتاً عامل مهمی برای پیشرفت موتورهای گازی بود. توزیع گاز شهر، دیگر لزومی نداشت زیرا مؤسسات صنعتی می‌توانستند با هزینه کمی گازسازهایی در اختیار داشته باشند. چنین می‌نماید که دم مؤسسه برادران کراسلی بود که برای نخستین بار در سال ۱۸۸۴ از گاز گازساز برای تغذیه موتورهای خود استفاده شد.

موتور دوهنگامی: موتورهای دوهنگامی پس از آنکه اختراع اوتو مزایای آنها را آشکار ساخت همراه با تراکم قبلی ساخته شدند. وانگهی این موتورها تغییر این اختراع را هم ممکن ساختند. این موتورها که پس از لغو امتیاز اوتو رها شده بودند بعداً به علت بعضی برتریهایی که نسبت به چرخه چهارهنگامی داشتند؛ افزایش قدرت با ظرفیت برابر سیلندر، نظم زیادتر در کار، استحکام و سادگی در ساختمان و ... از نو مورد توجه قرار گرفتند.

1. Charon

دیده شد که میلیون و بریتون در آن زمان برای متراکم ساختن گازها پیش از آنکه وارد سیلندر شوند، از تلمبه‌هایی استفاده می‌کردند و بارت و دوگران بدون اینکه از این کار سودی بگیرند این تراکم را در سیلندر انجام می‌دادند.

آقای کلرک مهندس انگلیسی در سال ۱۸۷۷، یعنی بلافاصله پس از پیدایش موتور اوتو، شروع به تغییر دادن چرخه چهارهنگامی به دوهنگامی کرد و برای این کار تراکم قبلی در داخل سیلندر را اجرا کرد. وی چندین موتور را طرح کرد که مؤسسه استرن و شرکا<sup>۱</sup> در گلاسگو آنها را ساختند. ورود سوخت بوسیله یک سوپاپ به کمک تلمبه در حدود لحظه‌ای که پیستون در پایان حرکت دانات بود انجام می‌گرفت. این تلمبه تنها برای وارد کردن مخلوط سوختی کار گذاشته شده بود اما همین‌که این مخلوط را کمی متراکم می‌ساخت به تخلیه گازهای سوخته شده یا رویدن آنها کمک می‌کرد. کار خروج گازها از سوراخهایی انجام می‌گرفت که پیستون در  $\frac{1}{4}$  مسیر خود آنها را باز نگاه می‌داشت و در حرکت برگشت هم تا مدتی باز نگاهداشته می‌شدند. ورود و خروج مخلوط سوختی عملاً روی هم قرار داشتند. سوراخهای فرار گاز، کمی زودتر باز می‌شدند و سوپاپ ورود گاز، کمی بیشتر باز می‌ماند. تراکم در جریان برگشت و پس از بسته شدن سوراخها انجام می‌گرفت. اشتعال به واسطه شعله‌ای که در یک کشو بود تأمین می‌شد و خنک شدن در اثر جریان آب. سیستم جالبی از روغنکاری قطره‌قطره به کمک روغندان پیستونی را آقای کلرک طرح کرده بود. کار موتور که با قدرت ۴ اسب و ۳۰۰ دور در دقیقه بود با یک رگولاتور مرکزگریز کنترل می‌شد. با این همه، تخلیه گازهای سوخته شده ناکامل باقی مانده بود و نوعی تخلیه پیش از وقت بخشی از سوخت تازه، سبب اتلاف سوخت می‌شد. برای رفع این نواقص که ذاتی این موتور بود، کلرک کوششهایی به عمل آورد و آن اینکه نخست هوای تنها را وارد کرد که نقش نوعی میانگیر بین گازهای سوخته شده و سوخت تازه ایفا می‌کرد. ولی وی در این کار آشکارا ناموفق بود.

مهندس دیگری از انگلستان با نام ج. رابسن<sup>۲</sup> در سال ۱۸۷۹ به راه‌حل دیگری دست یافت. وی موتوری طرح کرد که بوسیله تنگیز<sup>۳</sup> نامی ساخته شد. این موتور دوهنگامی و دوطرفه بود که در آن بخشی از سیلندر نقش تلمبه را داشت. این تلمبه مخلوط سوخت را وارد مخزنی می‌کرد که از آنجا به بخش حرکت‌دهنده سیلندر مکیده می‌شد.

این طرح را آقای ج. فیلدینگ در سال ۱۸۸۰ تکمیل کرد؛ وی نخستین موتوری را ساخت که از کارتر بسته شده به‌عنوان تلمبه سوخت‌رسان و رویدن گازهای سوخته شده استفاده می‌شد: موتور فیلدینگ فاقد مخزن بود و مخلوط سوخت مستقیماً از کارتر وارد سیلندر می‌شد. در این موتور،

تخلیه از راه سوپاپی انجام می‌گرفت که در سر سیلندر قرار داشت، و ورود سوخت از راه سوراخهایی که بوسیله خود پیستون باز و بسته می‌شدند.

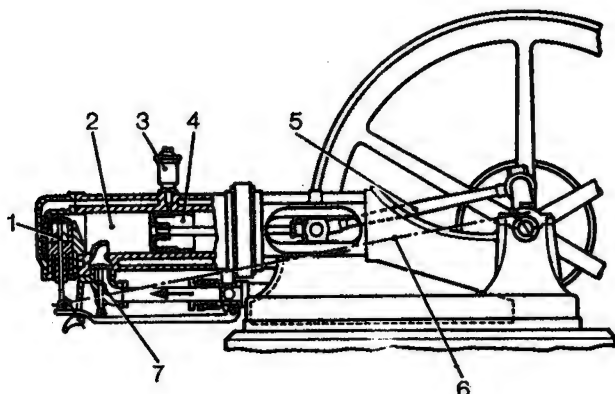
اندیشه کاربرد بخشی از سیلندر به‌عنوان تلمبه سوخت‌رسان و روبش گازهای سوخته شده، بوسیله یک نفر آلمانی با نام کونزاد انگله<sup>۱</sup> در سال ۸۷۸۱ نیز مورد بررسی قرار گرفت. اختراع وی الهام‌بخش آقای مایباخ در ساخت موتور *Standuhr* در سال ۱۸۸۴ بود.

قدیمی‌ترین موتور دوهنگامی آلمان در ۱۸۸۰ بوسیله مؤسسه‌ای در لیندن<sup>۲</sup> به نام *Hannoversche Maschinenbau - AG* بر پایه طرح‌های ویتینگ<sup>۳</sup> و هیس<sup>۴</sup> ساخته شد. این موتور شبیه موتور کلرک بود اما، برخلاف همه موتورهای پیش از خود، قائم بود و مخلوط سوخت آن کمی دیرتر در تلمبه فشرده می‌شد. مؤسسات دیگر آلمانی، بویژه: *Korting-Lieckfeld* و *Buss-Sombart* نیز موتورهای بسیار مشابهی ساختند. موتوری که در سال ۱۸۸۳ بوسیله کارل بنزه<sup>۵</sup> ساخته شد. (شکل ۸۱) حدود ده سال پر فروش بود. این موتور دو تلمبه داشت: یک تلمبه هوا که شامل کارتری بسته بود و یک تلمبه گاز که موتور آن را فعال می‌ساخت. هوای فشرده طی نیمه نخست مسیر وارد سیلندر می‌شد و گاز روشنایی حدود میانه مسیر.

در مورد توزیع سوخت، راه‌حلهای تازه‌ای را مؤسسه انگلیسی *Day & Sons* در سال ۱۸۸۹ پیشنهاد کرد که تنها سوراخهای موجود در جدار سیلندر را که بوسیله پیستون باز و بسته می‌شدند پذیرفته بود. کارتر بسته، هم به‌عنوان تلمبه فشار و هم به‌عنوان روبنده گازها عمل می‌کرد. این همان مدلی است که بعدها بر روی موتورهای با سوخت مایع، تکمیل شد.

گرچه موتور دوهنگامی با تراکم قبلی در فرانسه: بوسیله راول و بنیه و در امریکا نیز بوسیله ناش و گرت<sup>۶</sup> ساخته می‌شد، به دلایلی که بعدها خواهیم گفت گسترش آن در این زمان بسیار محدود ماند. موتور دیزل بود که بعدها پیشرفت این چرخه را، بویژه برای قدرتهای زیاد تأمین کرد، و در این زمینه حقیقتاً انحصاری شد. این موتور تنها در سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ آن‌هم به‌عنوان موتور بنزینی مجدداً وارد میدان شد که از رواج آن در آن زمان همگان اطلاع دارند.

موتورهای پر قدرت: به‌کارگیری موتورهای بنزینی، که از آنها سخن رانندیم، سبب رکورد سریع موتورهای گاز شد. با این‌همه، از میان این موتورها، واحدهای با قدرت زیاد، از پایان سالهای ۸۰ کاربرد مدیدی یافتند. استفاده از گازهای کوره‌های بلند و سپس گازهای پست به‌عنوان سوخت، که از منابع انرژی صنعتی با صرفه‌ای بودند تا رواج موتورهای دیزل ادامه داشت.



شکل ۸۱. موتور دوهنگامی بنز (۱۸۸۳).

۱. سوپاپ تخلیه؛ ۲. سیلندر حرکت؛ ۳. سیستم روغنکاری؛ ۴. پیستون؛ ۵. شاتون؛ ۶. اهرم فرمان سوپاپ تخلیه؛ ۷. سوپاپ ورود هوا. تلمبه احتراق و سوپاپ ورود سوخت و نیز مکانیزم اشتعال نمایان نیستند.

موتورهای پر قدرت نخستین از سال ۱۸۸۸ در فرانسه بوسیله مؤسسات دلامار-دبوت ویل و لوتونب، در آلمان بوسیله مؤسسات آلکلهويزر<sup>۱</sup> و یونکرس، سپس بوسیله کورتینگ دویتس، در بلژیک بوسیله کاکریل و غیره ساخته می شدند. آنها به شکل موتورهای دوهنگامی، چهارهنگامی، یکطرفه و دوطرفه بودند. این موتورهای بسیار محکم در سال ۱۹۰۰ به بازدهای حرارتی بسیار بالایی؛ ۲۵-۲۷٪ دست یافتند. در سال ۱۹۲۴ مؤسسه MAN از این موتورها با قدرت ۴۴۰۰ اسب و مؤسسه لوکروزو و در ۱۹۳۰ موتورهای با قدرت ۸۵۰۰ اسب ساخت و از آن پس مخصوص سیدروزی (آهنکاری) شدند.

### موتورهای بنزینی

پیش از سال ۱۸۶۰، تاریخ نخستین موفقیت لنوار، کاربرد بخشهای سبک نفت به عنوان سوخت موتورها بررسی می شد. بنزین نفت در پرتو تبخیر می توانست آسان جایگزین گاز شود. برخی از تجربه گران، از جمله رابرت استریت پیش از سال ۱۸۶۰ و بعدها ماشین سازانی نظیر لنوار، مایاخ، هوک در این راه گامهایی برداشتند. اما ساخت موتور چهارهنگامی اوتو اذهان را متوجه کاربرد

عمومی تراکم قبلی ساخت.

اما موتورهای گازسوز نمی‌توانستند جابه‌جا شوند و بنابراین آن آرزوی حرکت دادن مکانیکی وسایل راهپیمای بود که انگیزه کارهای اولیه برای استفاده از بنزین شد - کاری که بدون اصلاحات بنیادی در موتورهای گاز سوز هم عملی بود.

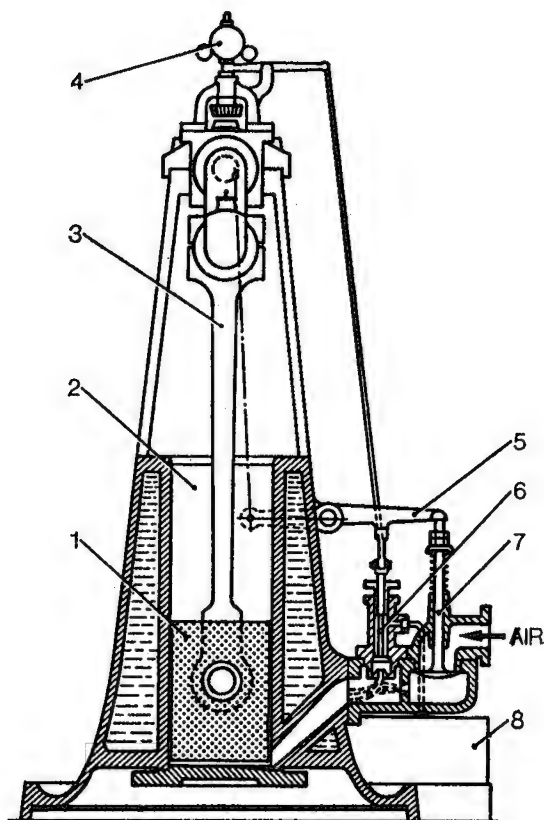
در باره اینکه کدام موتور «انفجاری» با سوخت مایع کار کرده است، نمی‌توان با اطمینان سخن گفت. این افتخارگویا نصیب یک موتور تک سیلندری دوهنگامی می‌شود که آقای فرنان فور در سال ۱۸۸۰ ساخته است. در همین سال در آلمان نیز مؤسسه Hannoversche Maschinenbau-AG یکی از موتورهای دوهنگامی گازسوز خود را که آقایان ویتینگ و هیس طراحی کرده بودند با بنزین راه انداخت (شکل ۸۲)، مخلوط سوختی، پس از سوپاپ ورود، با گرد شدن بنزین در جریان هوای جذب شده تشکیل می‌شد، کمی بعد آقای لنوار از یک‌سوی و دلامار - دیوت ویل از سوی دیگر همین کارها را روی موتورهای خود انجام دادند.

یکی از نخستین موتورهایی که برای سوخت بنزینی طراحی شده بود و فقط بنزین مصرف می‌کرد در سال ۱۸۸۴ بوسیله یوهانس اشپیل<sup>۱</sup> ساخته شد. این موتور از نوع افقی چهارهنگامی بود؛ توزیع آن بوسیله سوپاپها و اشتعال در آن با شعله و به کمک کشوی اشتعال انجام می‌گرفت. بنزین از مخزن بنزین بوسیله یک تلمبه کوچک به محفظه کوچکی که سوپاپ ورود سوخت در آن بود فرستاده می‌شد. در آنجا بنزین تبخیر و در هوایی که در مدت ورود آن مکیده شده بود به شکل گرد درمی‌آمد، مخلوط سوختی تشکیل شده به سیلندر راه می‌یافت.

در سال ۱۸۸۵ موتورهای بنزینی، بویژه به هدف تحقق حرکت مکانیکی خودروها تکامل داده شدند. این تکامل با راه‌اندازی دو عنصر اساسی کاربوراتور و سیستم اشتعال مشخص می‌شود. در این زمان سیستم اشتعال را «مشکل مشکلات» به‌شمار می‌آوردند.

کاربوراتورها: تولید مخلوط سوختی با سوخته‌های مایع مشکلی بود که موتورهای گازسوز آن را حل نکردند. در مورد خود بنزین، ماشین‌سازان کوشیدند تا برای حل آن، نخست روش موتورهای گازسوز را اصلاح کنند (اشپیل، ویتینگ، هیس) و به‌طور ساده بنزین را در جریان هوایی که در سیلندر مکیده شده بود قرار دهند. اما گردی که بدین‌ترتیب ایجاد می‌شد مخلوط همگنی نبود و، بنابراین می‌بایست در پی یافتن وسیله مخصوصی، کاربوراتور، و بعدها تزریق بنزین باشند.

کاربوراتورهایی که برای نخستین بار طراحی شدند در اساس، بدنه مشبکی آغشته به بنزین یا نفت بود که، هوایی که مکیده و وارد سیلندر می‌شد از آن عبور می‌کرد. این وسیله را، کاربوراتورهای



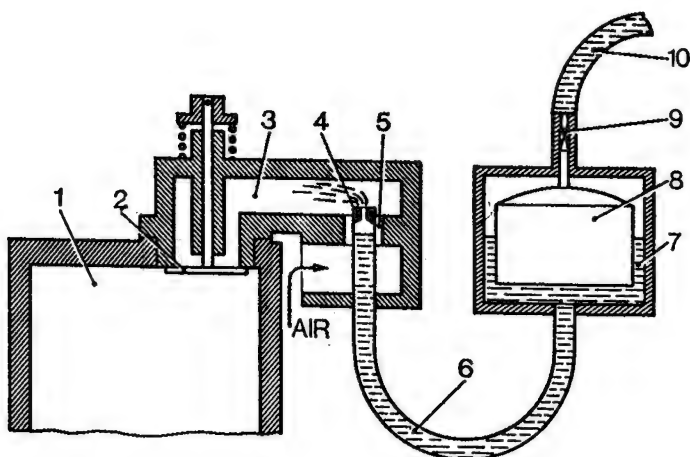
شکل ۸۲. موتور دوهنگامی Hannoversche Maschinenbau-AG (۱۸۸۰).

۱. پیستون؛ ۲. سیلندر؛ ۳. شاتون؛ ۴. رگولاتور مرکزگریز؛ ۵. اهرم فرمان توزیع؛ ۶. سوپاپ ورود سوخت؛ ۷. سوپاپ ورود هوا؛ ۸. مخزن سوخت.

لیسنده می‌نامیدند. در آن زمان، ۱۸۲۶، آقای آزاردا<sup>۱</sup> از یک وسیله پیچیده‌ای استفاده می‌کرد که جدار آن با سوخت آغشته می‌شد تا به موتوری که در بالا از آن سخن رفت سوخت رسانیده شود. آقای بریتون در سال ۱۸۷۳، همان‌طور که دیدیم، یک نمذ را بین دو صفحه آهنی مشبک قرار می‌داد. از میان این اصلاحات، تنها کاربرد شناوری برای ثابت نگهداشتن تراز بنزین در کاربوراتورهای لیسنده را می‌توان کار جالبی به‌شمار آورد.

1. Hazard



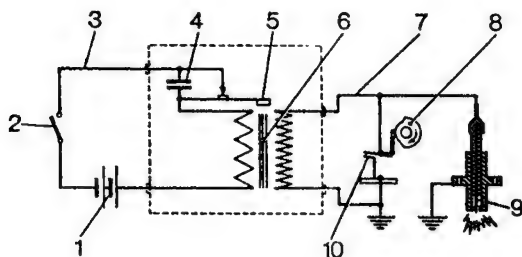


شکل ۸۳. کاربوراتور ژینگلوری مایباح (۱۸۹۳).

۱. سیلندر حرکت؛ ۲. سوپاپ سوخت؛ ۳. مجرای ورود سوخت؛ ۴. ژینگلور؛ ۵. گلوبی؛ ۶. لوله بنزین؛ ۷. محفظه با تراز ثابت؛ ۸. شناور؛ ۹. ساسات (چوک)؛ ۱۰. لوله بنزین.

وسایلی که پیشنهاد شدند بسیار متنوع بودند و هر تکنسین موتور، در این باره نظرات خاص خود را داشت. پس از ده سال آشفتگی، نخستین کاربوراتور ژینگلوری (افشانکی) را در سال ۱۸۹۳ آقای ویلهلم مایباح ساخت (شکل ۸۳). مایباح با کاربرد یک گلوبی که همگرا-واگرا بود، یک ژینگلور و یک پیاله شناور، مشکل را برای همیشه حل کرد. در همان سال، کارل بنز به این سیستم، درجه پولکی را افزود تا مقدار سوختی که وارد سیلندر می شود طبق خواست راننده باشد. طبیعتاً در آن زمان و تا زمان ما، کاربوراتور اولیه دست خوش تغییرات زیادی بوده است. از جمله آقای لونگمار، حدود سال ۱۸۹۹ در تلاش برای تأمین ترکیب ثابتی از مخلوط گازی بود. اما بزودی معلوم شد که غنای مخلوط گازی باید همراه با رژیم موتور، راه اندازی، شتاب یافتن، آهسته شدن و ... تغییر کند. بدین ترتیب با شروع سال ۱۹۰۰ وسایل گوناگونی عرضه شد که به این تغییرات پاسخ می دادند. کاربوراتور با ژینگلور غرق شده در اول بوسیله آمده بوله (پسر) در سال ۱۸۶۹ طرح شد و بعدها آقای سولکس<sup>۱</sup> خود را وقف آن ساخت. کاربوراتور با ژینگلور جبرانی در سال ۱۹۰۵ بوسیله باوری<sup>۲</sup> ساخته شد، سپس با نام زنیت<sup>۳</sup> و ... شهرت یافت.

1. Solex 2. Baverey 3. Zenith



شکل ۸۴. مکانیسم اشتعال اختراعی بنز (۱۸۸۵).

۱. پیل الکتریکی؛ ۲. کنتاکت؛ ۳. مدار اولیه؛ ۴. خازن؛ ۵. لرزنه؛ ۶. قرقره القا؛ ۷. مدار ثانوی؛ ۸. بادامک؛ ۹. شمع؛ ۱۰ پلاتین.

این سیستم تزریقی در پایان سده، تنها برای سوخت‌رسانی به موتورهای دیزل ساخته شد و درباره آن باز سخن خواهیم گفت. پس از سال ۱۹۳۰ بود که برای موتورهای بنزینی هواپیما و حدود سال ۱۹۰۵ برای موتورهای اتومبیل پذیرفته شد.

اشتعال: اشتعال با شعله که متناسب موتورهای گازی صنعتی بود به علت خطر انفجار و محدود بودن طرز کار آن، برای موتورهای بنزینی نامتناسب بود، کوششی، البته بدون موفقیت زیاد، برای ایجاد اشتعال بوسیله لامپهای ملتهب انجام گرفت.

سرانجام، تنها روش اشتعالی که پس از سال ۱۹۰۰ باقی ماند اشتعال برقی بود. این کار با تغذیه شمع بوسیله یک مدار ثانوی قرقره القاء توسط یک توزیع‌کننده شروع شد (شکل ۸۴). اما باطریها بسیار زود تخلیه شدند؛ و بنابراین، برای رفع این نقیصه کوشیدند. لئوار در سال ۱۸۸۵ نوعی شمع بسیار پیشرفته طرح کرد که تقریباً مشابه شمعهایی است که امروز به کار می‌روند. آقای بنز در سال ۱۸۹۳ توزیع‌کننده‌ای را در مدار اولیه کم‌فشار قرقره القا جا داد و بدین ترتیب تخلیه آن را آهسته کرد. در این طرح بنز، امکان تغییر دادن دستی زمان اشتعال، به واسطه میله‌ای که روی توزیع‌کننده عمل می‌کرد، پیش‌بینی شده بود. این تغییر زمان اشتعال گرچه کاری کوچک بود اما برای خوب کار کردن موتوری که بعدها خودکار شد بسیار اهمیت داشت.

آقایان دیون<sup>۱</sup> و بوتون<sup>۲</sup> در سال ۱۸۵۹ وسیله بنز را تکمیل کردند. آنان به جای توزیع‌کننده دارای کنتاکت ساده، از توزیع‌کننده بادامکدار استفاده کردند و بدین ترتیب از دقت بسیار بزرگتری در تولید جرقه بهره‌مند شدند.

این سیستم اشتعال با باتری و قرقره القا با توزیع‌کننده کم‌فشار در سال ۱۹۰۰ عمومیت یافت. برای موتورهای چند سیلندری برای هر سیلندر یک قرقره به‌کار می‌رفت. آقای نیر در سال ۱۹۰۳ به توزیع با فشار قوی بازگشت. وی برای موتورهای چند سیلندری، یک قرقره به‌کار می‌برد اما با توزیع‌کننده دارای فشار قوی و بادامک چندجانبه برای فرمان دادن به کلید بود تا جریان فشار ضعیف مدار اصلی قطع شود. این طرح نیر، پایه اشتعال جدید است. در همین دوران اشتعال بوسیله مگنت شروع به طرح‌ریزی شد تا نقص تخلیه سریع باتریها از بین برود.

نخستین مگنت را گیزنبرگر<sup>۱</sup> در ۱۸۸۰، فرنان فوره در ۱۸۸۳ - ۱۸۸۴ و اوتو در ۱۸۸۴ ساختند که از نوع مگنتهای «فشار ضعیف» بودند. این مگنتها دارای القاگری بودند که حول محور خود، بین دو قطب یک آهنربا، به‌کمک بادامکی نوسان می‌کردند. در این شرایط یک جریان متناوب از مدار می‌گذشت. این مدار به کلیدی وصل می‌شد که در محفظه احتراق کار گذاشته شده بود، و بدین ترتیب دو سر آن در لحظه حداکثر فشار در هر نیم دور، به‌طور مکانیکی از یکدیگر جدا می‌شدند و جرقه می‌زدند.

باید به پیچیدگی مکانیکی این سیستم توجه کرد، سیستمی که نخستین راه‌حل پیشنهادی برای کاربرد مگنت برای اشتعال را ارائه داشت. چنانچه جزئیات نمونه‌های متعدد دیگر را به‌هم نزدیک کنند، که برخی از آنها در صفحات پیش شرح داده شده‌اند - با نوعی پیشرفت تقریباً عمومی خلاقیت تکنیک روبه‌رو می‌شویم: در میدانی که بتازگی گشوده شده است، راه‌حلهایی که در آغاز پیشنهاد می‌شوند معمولاً پیچیده‌تر از راه‌حلهایی هستند که در پرتو تجربه به‌دست آمده‌اند و عملی هستند.

در رابطه با مگنت، بازهم باید یادآور شد که برای جلوگیری از اشتعال پیش از موقع، بعداً بادامک دیگری افزوده شد. کمی جابه‌جا شدن این بادامک در پشت بادامک قبلی، سبب می‌شود که ایجاد جرقه نسبت به لحظه راه‌اندازی عقب بماند. مزیت مگنت ایجاد منظم قوسهای با شدت زیاد برای هر سرعت گردش موتور است. اما این بادامک برای موتورهای بسیار سریع مناسب نبود. وانگهی موضع کنتاکتها درون محفظه احتراق، که به دشواری انجام می‌گرفت، معمولاً ضایع می‌شد. برای بهبود این سیستم اشتعال بی‌درنگ به تکاپو افتادند. به‌دنبال این کوششها بود که مگنت «با فشار بالا» ساخته شد؛ راه‌حلی بسیار هوشمندانه، که شامل گردانیدن یک قرقره القا بین دو قطب یک آهنربای دائم، حول محور عمودی آن بود. بدین ترتیب مگنتی ساخته شد که القاگیر

(روتور) آن، سیم پیچ ورودی قرقره بود و این سیم پیچ در پرتو آرایش عادی خود جریان با فشار بالایی را در سیم پیچ خروجی القا می کرد. می توانستند به شمعهایی که با سیم پیچ تغذیه می شدند و یک توزیع کننده مراجعه کنند. نخستین مگنت با فشار بالا را آقای گوئلیب هونولد<sup>۱</sup> با مشارکت روبرت بوش در سال ۱۹۰۲ ساختند. اما این مگنت را قبلاً مهندسی بلژیکی با نام پل وینان<sup>۲</sup> که در دویتس کار می کرد در سال ۱۸۸۷ ساخته بود. مؤسسه روبرت بوش که وقف ساختن قسمتهای برقی موتورهای شده بود بعدها نخستین مگنت با فشار بالا را ساخت.

این سیستم بعدها در نوع بسیار محکم خود با آهنربای دائمی گردنده و قرقره های ثابت ساخته شد. گاهی، بویژه در مورد موتور هواپیما، هر دو سیستم اشتغال، با باتری و با مگنت دارای فشار بالا، موازی یکدیگر به کار گرفته می شوند. پس از یک دوره رقابت فشرده این دو سیستم برای موتورهای اتومبیل، از سال ۱۹۲۵ اشتغال با باتری غالب شد.

خنک سازی و روغنکاری: مسأله خنک سازی پس از تجسس کوتاهی حل شد. آقای ویلهلم مایباخ در سال ۱۸۹۲ روی موتور *Phoenix* به کار گرفتن یک چرخ طیار را که با آب در جهت محیطی می گردید تجربه کرد. آقای پژو<sup>۳</sup> در سال ۱۸۹۶ آب را در شاسی اتومبیل گردانید. مایباخ در سال ۱۸۹۷ با ساختن نخستین رادیاتور لوله ای به حل مسأله بسیار نزدیک شد. این رادیاتور بسیار سنگین و گران بود، اما بخوبی خنک می کرد و به کمک وی، دایملر - مایباخ توفیق یافتند موتورهای قویتری بسازند.

مایباخ در سال ۱۹۰۱ نوع دیگری رادیاتور ساخت که کمتر سنگین و فضاگیر بود. این رادیاتور همان «کندویی» بود که از آن پس تنها رادیاتور آبی موتورهای درونسوز باقی ماند. این رادیاتور با پروانه ای که موتور آن را می گردانید. تکمیل شد.

در باره روغنکاری، ساخت موتورهای دارای کارتر بسته و کاربرد آن به عنوان مخزن روغن، روغنکاری با هم زدن میل لنگ در ظرف روغن را ممکن ساخت. راه حل دیگر با گرداندن روغن نیز بوسیله پنار<sup>۴</sup> سپس روغنکاری تحت فشار برای نخستین بار بوسیله دیون - بوتون در سال ۱۹۰۳ در اتومبیل های دلونه - بل ویل پیشنهاد شدند.

موتورهای اتومبیل مرحله نخست: همین که ماشین بخار دوطرفه در دسترس قرار گرفت برای کاربرد آن در راندن وسایل راهیما کارهای گوناگونی انجام گرفت. در مجلد سوم این اثر چند نمونه داده شده است. اما ماشین بخار برای عمومیت یافتن این نوع حرکت، نارساییهایی داشت: تأخیر در تحت فشار قرار گرفتن، وزن زیاد آب، وزن سوخت. بدین ترتیب گرچه در جریان سده نوزدهم کارهای

متعددی به نتایجی رسیدند که می‌توانستند امید به موفقیت را در دلها شکوفا سازند - بویژه کارهای: گورنه، آمده بوله، سرپوله - اما همین‌که موتور بنزینی به درجه‌ای از تکامل رسید، تعیین شد که این نوع موتور تنها راه حل مشکلات آینده است. همین‌طور می‌توان گفت که امکان حرکت مکانیکی روی جاده‌ها، راه تکامل موتور بنزینی را معین ساخت.

با این‌همه، اثبات این ادعا یک دهه به درازا کشید. در واقع لازم بود که برای سازگار کردن خود موتور، تعدادی مشکل کوچک مکانیکی حل شود.

دلایم - دیوت ویل و مالاندن نیز در سال ۱۸۸۴ در سازگار کردن موتورهای Simplex برای پیش بردن یک وسیله، بدون موفقیت کارهایی کردند، اما به مرحله تولید صنعتی دست نیافتند. نتایج کارهای لنوار و ماشین‌سازان وی، برادران روار، زیاد مورد اعتماد نیست.

بسیار دیده شده است که ماشینی را که آقای زیگفرید مارکوس<sup>۱</sup> در سال ۱۸۷۵ در وین ساخته است با تاریخ اشتباهی ۱۸۶۴، اولین اتومبیل معمولی می‌دانند. آقای بون ویل از مدتها پیش نشان داده است که این ادعا کاملاً بر خطاست و حتی ثابت کرده است که نوعی حقه‌بازی است. رساله‌ای اخیراً (مارس ۱۹۷۵) مربوط به موزه تکنیکها در وین یک سالشمار نهایی برای کارهای مارکوس به چاپ رسانیده است که نشان می‌دهد هر کدام از ساخته‌های وی پس از ساخته‌های نوآوران مختلف در انواع موتورها انجام گرفته‌اند. بویژه اتومبیل مشهور احتمالاً ۱۸۷۵ وی، که یک موتور بنزینی چهارهنگامی داشت، تنها در سال ۱۸۸۸، یعنی چند سال پس از موفقیت نخستین کارل بنز، روبراه شد.

در حقیقت، کارل بنز در آلمان، پس از موفقیت موتور دوهنگامی خود در ۱۸۸۳، نخستین موتور مناسب اتومبیل را در سال ۱۸۸۴ ساخت. این موتور تک سیلندری افقی برپایه چهارهنگامی بنزین مصرف می‌کرد و با ۳۵۰ دور در دقیقه ۸/۸۸ اسب قدرت داشت. در سال ۱۸۸۶ این موتور را روی یک سه‌چرخه دارای دیفرانسیل (برای انتقال حرکت) نصب کردند و در ژوئیه ۱۸۸۶، نخستین اتومبیل آلمانی بود که حرکت می‌کرد. موتور آن هنوز نسبتاً سنگین و توان حجمی آن کم بود.

موتورهای سریع: نخستین کسانی که گمان داشتند که افزایش سرعت گردش موتور، وسیله‌ای اساسی برای کاستن از وزن و افزایش توان حجمی آن است، صنعتگران آلمانی - گوتلیب دایملر و ویلهلم مایباخ - بودند. آنان نخستین کسانی بودند که موتورهای سبکی با دور زیاد ساختند و راه به‌کارگیری موتورهای بنزینی را برای حمل‌ونقل با موفقیت گشودند.

نخستین موتوری که بوسیله مایباح و دایملر برای داشتن ۶۰۰ دور در دقیقه ساخته شد از نوع افقی، بدون خنک شدن (سیلندر مفرغی)، چهارهنگامی و گازسوز بود. این موتور در سال ۱۸۸۳ ساخته شد. دایملر برای اشتعال، لامپ التهابی خود را در ارتباط مستقیم با محفظه احتراق قرار داد و نوعی سیستم توزیع بسیار ابتکاری را در آن سوار کرد، بعدها این موتور به شکل عمودیش هم ساخته شد.

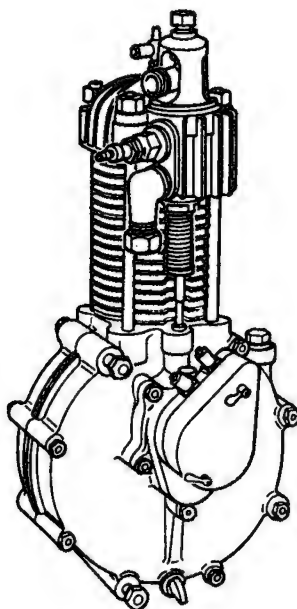
موتور دومی که با دور زیاد ساخته شد، اما دارای خنک کننده بود به نام *Standuhr* شهرت یافت و مایباح در ۱۸۸۴ آن را ساخت. از خصوصیات این موتور این بود که کارتر آن بسته و به عنوان تلمبه رویشی کار می کرد؛ هوایی که در کارتر طی حرکت دتانت پیستون فشرده می شد طی حرکت تنفسی، بوسیله سوپاپی خودکار که در پیستون جاسازی شده بود، در سیلندر وارد می شد. این روش سوخت رسانی - رویش که کارتر انجام می داد و در آن زمان روی موتورهای دوهنگامی با موفقیت به کار رفته بود - برای موتورهای چهارهنگامی کارایی نداشت، بخصوص قفل و بست کارتر. بدون اینکه به عنوان تلمبه رویش مورد استفاده باشد، کارتر قطعه جالبی در ساختمان موتور بود که از آن در برابر گرد و خاک حمایت می کرد و بویژه همچون مخزن لازم برای سیستم روغنکاری به کار می رفت.

یک موتور *Standhur* که کاربوراتوری که مایباح ساخته بود به آن بنزین می رسانید و هوا آن را خنک می کرد و در ۶۰۰ دور در دقیقه نیم اسب قدرت داشت روی دوچرخه ای نصب شد و برای اولین بار در نوامبر ۱۸۸۵ دوچرخه را راه برد.

موتور دیگری از آن با قدرت ۱/۲ اسب که نخست با هوا سپس با آب خنک می شد در پاییز سال ۱۸۸۶ روی چهارچرخه ای با انتقال حرکت تسمه ای و نیز روی قایقی کار گذاشته شد. تکامل موتورهای درونسوز بنزینی ویژه اتومبیل در جهت افزایش قدرت و کاهش وزن برای هر اسب از طریق زیاد شدن سرعت دور موتور ادامه یافت.

ماشین سازان دیگری دست به کار ساخت موتورهای سریع شدند. کارل بنز در ۱۸۸۹ موتوری ساخت که با ۶۰۰ دور در دقیقه، سه اسب قدرت داشت و در سال ۱۸۹۳ موتور دیگری ساخت که با ۷۰۰ دور در دقیقه ۱/۵ اسب قدرت آن بود و روی دوچرخه ای کار گذاشته شد.

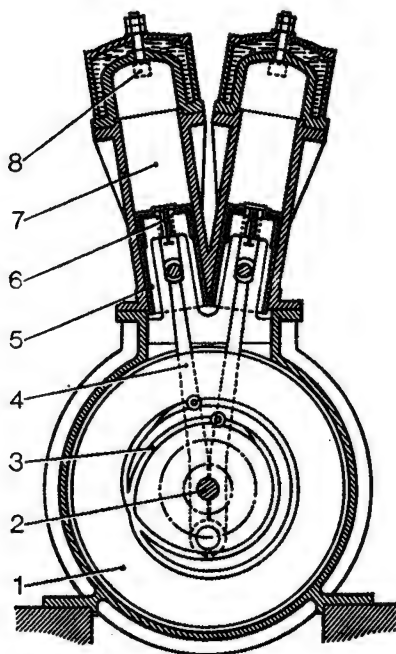
حدود سال ۱۹۰۰ شرکت دیون - بوتون موتوری ساخت که سرعت گردش زیادی داشت و نیز دارای امتیاز سبکی، کمتر از ۱۰ کیلوگرم برای هر اسب بود (شکل ۸۵). تا پایان جنگ جهانی اول، سرعت موتورهای رایج از ۳۰۰۰ دور در دقیقه فراتر نرفت.



شکل ۸۵. موتور شرکت دیون - بوتون (حدود سال ۱۹۰۰).

موتورهای چند سیلندری: باید گفت که باز هم این دایملر و مایباح بودند که در سال ۱۸۸۹ نخستین موتور سریع چند سیلندری را با دوتایی کردن موتور *Standthur* خود، ساختند. این موتور تازه همان موتور مشهور دو سیلندری خورجینی، V شکل، با زاویه ۱۷ است (شکل ۸۶). او در آغاز همه مشخصات *Standthur* را داشت: کارتر بسته شده که همچون تلمبه رویشی عمل می‌کرد، توزیع با سوپاپ خودکار تنفسی، اشتعال با لامپ ملتهب و بالاخره خنک شدن با آب. این موتور در ابتدا با ۶۰۰ دور در دقیقه ۱/۵ اسب و سپس با ۶۲۰ دور در دقیقه دو اسب قدرت داشت.

این موتور روی وسیله‌ای که مایباح برای آن طرح کرده بود گذاشته شد: شاسی از لوله‌های فولادی، انتقال حرکت با چرخدنده، جعبه دنده چهار سرعتی (بین ۵ تا ۱۶ کیلومتر در هر ساعت)، کلاچ اصطکاکی مخروطی و هدایت با چرخهای جلو بود. این اتومبیل را که در نمایشگاه جهانی پاریس در ۱۸۸۹ عرضه شد می‌توان نخستین اتومبیل نوین دارای موتور درونسوز به‌شمار آورد. پتار و لواسور در سال ۱۸۹۰ امتیاز دایملر را خریدند و نخستین سازندگان اتومبیل در فرانسه



شکل ۸۶. موتور خورجینی دایملر-مایباخ (۱۸۸۹).

۱. چرخ طیار در کارتربسته؛ ۲. اهرم حرکت دهنده؛ ۳. راهنمای سوپاپهای تخلیه گاز؛ ۴. شاتون؛ ۵. پیستون؛ ۶. سوپاپ خودکار ورود سوخت؛ ۷. سیلندر حرکت؛ ۸. سوراخ سوپاپ تخلیه و اشتعال با لامپ ملتهب.

و نیز نخستین فروشندگان اتومبیل در جهان شدند. آنان اصلاحات اساسی در ساخت این اتومبیل به عمل آوردند: گذاردن عمودی موتور در جلوی اتومبیل از آنهاست. آنها را می توان همراه دایملر و مایباخ خلاق اتومبیل جدید دانست.

آقای آرمان پژو که از ساخت اتومبیل با دیگ بخار سرپوله صرف نظر کرده بود از سال ۱۸۹۱ به ساخت اتومبیل با موتور دایملر پرداخت.

موتور دایملر علاوه بر فرانسه در کشورهای دیگر نیز راه یافت. در انگلستان آقای ف. ر. سیمز<sup>۱</sup> امتیاز ساخت این موتور را در ۱۸۹۰ در انگلستان و مستعمرات آن به دست آورد. در امریکا اولین موتور دایملر حدود سال ۱۸۸۸ بوسیله ویلیام شتاینوی<sup>۲</sup> وارد شد.



این موتور بدلیل استفاده از یک سوپاپ تنفسی تحت فرمان، مورد اصلاحی قرار گرفت که در سرعتهای زیاد گردش و حذف سیستم روبش بوسیله کارتر، برای آن لازم بود.

این موتور جدید مایباح- دایملر برای چند سال بهترین موتور اتومبیل بود. قدرت آن تا چهار اسب بالا رفت و این محدوده به علت افزایش وزن بدان تحمیل شده بود. اتومبیلهای پنار- لواسور و پژو با این موتور در نخستین مسابقه اتومبیلرانی در سال ۱۸۹۴ پاریس- روان جایزه نخست را به دست آوردند و در سال بعد پنار- لواسور در دومین مسابقه اتومبیلرانی پاریس- بوردو اول شد. نخستین موتورهای هواپیما: موتورهای خورجینی (V شکل) بعدها با ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ سیلندر ساخته شدند. از میان موتورهای خورجینی بسیار مشهور، پیش از پایان جنگ جهانی اول، می توان از موتور Antoinette با ۸ سیلندر و ۳۴ اسب قدرت نام برد که لئون لوواسور مهندس فرانسوی در سال ۱۹۰۵ آن را برای یک قایق موتوری ساخته بود، و دومی آنکه ۱۶ سیلندر و ۵۰ اسب قدرت داشت هواپیمای مشهور *Demoiselle* متعلق به آقای سانتوس- دومونت<sup>۱</sup> را مجهز ساخت. با همین هواپیما بود که سانتوس دومونت در سال ۱۹۰۶ به باگانل<sup>۲</sup> پرواز کرد و بدین ترتیب نخستین پرواز را در اروپا انجام داد. همین موتور را آقای کورنو<sup>۳</sup> در سال ۱۹۰۷ روی نخستین هیلکوپتر کار گذاشت و برادران ووازن<sup>۴</sup> (گابریل و شارل) روی هواپیمایی که خود ساخته بودند؛ و باز با همین موتور آقای هنری فرمن<sup>۵</sup> در سال ۱۹۰۸ برای نخستین بار یک کیلومتر به ایسی-له-مولینو<sup>۶</sup> پرواز کرد. در همین زمان است (۱۹۰۸) که موتور هشت سیلندری V شکل ۹۰ درجه با تنها میل سوپاپ را دیون- بوتون برای اتومبیلی ساختند.

نوع دیگری از ساختهای حرکتی، آرایش خطی ۲، ۴، ۶، ۸ سیلندری بود. موتور چهار سیلندری خطی را آقای فرنان فوره در سال ۱۸۸۹ طرح کرد. این موتور از نوع چهارهنگامی با اشتعال الکتریکی بود. سوپاپ تنفسی آن، مانند سوپاپ فرار گاز، خودکار و با تأخیری بسته می شد تا سیلندر بهتر پر شود. این موتور روی کشتی تفریحی *Ellen* کار گذاشته شد.

موتورهای دیگری از این نوع سرعت ساخته شدند: موتور مایباح در ۱۸۹۰ که با ۶۲۰ دور در دقیقه ۵ اسب قدرت داشت و برای هر اسب، ۳۰ کیلوگرم وزن؛ موتور فوره در ۱۸۹۱ نخستین موتوری که مدت تنفس آن متغیر بود و به مقدار لغزش میل سوپاپ بستگی داشت. موتور ده اسبی

۱. Santos-Dumont آلبرتو ۱۸۷۳ - ۱۹۳۲، مهندس و فضانورد برزیلی، متولد پالمیرا که از ۱۸۹۱ تا ۱۹۲۸ در فرانسه اقامت داشت.

۲. Bagatelle کاخی که در ۱۷۷۷ در کنار جنگلهای بولونی برای کنت آرتوا ساخته شد.

3. Paul Cornu 4. Voisin 5. H. Farman 6. Jssy-les-Moulineaux

ساخت پناز در ۱۸۹۸ مخصوص اتومبیل، نخستین موتور چهار سیلندری خطی بود که نسبت به یک صفحه میانی عمود بر محور میل لنگ متعادل بود. این موتور اتومبیل رنو در سال ۱۹۰۲ ساخته شد. موتور پرآوازه مرسدس که روی یک هواپیما و بالونهای هدایت شونده زپلین کار گذاشته شد. این موتور را پاول دایملر در ۱۹۰۷ ساخت، با ۱۴۰۰ دور در دقیقه، ۱۳۵ اسب قدرت داشت، برای هر اسب، دو کیلوگرم. این موتور برای بالون هدایت شونده زپلین ساخته شده بود، اما برای هواپیما نیز به کار گرفته شد.

در امریکا نخستین موتور را با ۱۲ اسب قدرت برادران رایت<sup>۱</sup>: اورویل و ویلبر در سال ۱۹۰۲ ساختند. و با آن توانستند در ۱۷ دسامبر ۱۹۰۳ به کیتی-هاک<sup>۲</sup> پرواز کنند و بدین ترتیب عصر هوانوردی آغاز شد. این یک موتور افقی بود که با آب خنک می شد. اشتعال آن با برق بود و ۱۰۹ کیلوگرم وزن داشت. این موتور دو ملخ را به کمک دو زنجیره دو چرخه می گردانید. پس از آن موتوری با ۸۰ اسب در سال ۱۹۰۴ به وسیله فورد برای اتومبیلش ساخته شد و از آن پس موتور ۲۰ اسب بود که برای اتومبیلهای معروف فورد T ساخته شدند.

تحقیق برای ایجاد تعادل: در همین زمان موتورهای سیلندر خطی به علت کیفیت بسیار خوب تعادل و یکنواختی کوپل (گشتاور پیچشی) در آنها بسیار متداول شده بودند.

موتورهای هشت سیلندر خطی نیز ساخته می شدند که می توان از موتور بالون هدایت شونده ساخت دایملر در ۱۹۱۱ نام برد که ۲۴۶ اسب قدرت داشت و در هر دقیقه ۱۲۰۰ دور می گردید.

مؤسسه دیون-بوتون در ۱۸۹۵ نخستین موتور دارای دو سیلندر متقابل معروف به *flat-twin* را ساخت. موتور دیگری از همین ردیف را آقای بنز در ۱۸۹۶ در انواع مختلف از ۵/۹ و ۱۴ اسب و با ۹۰۰ دور در دقیقه ساخت. آقای ف. و. لنچستر<sup>۳</sup> نخستین سازنده موتور اتومبیلهای انگلیس بود. در سال ۱۸۹۶ نخستین موتور و در سال بعد موتور دوم را از همان نوع ساخت. این موتورها دارای مزیت کوچکی حجم و تعادل خوب در حرکت بودند.

موتورهای با سیلندرهایی ستاره ای (شعاعی)، ویژه هواپیما بودند و در سال ۱۸۸۸ ساخته شدند. محورهای سیلندرها در یک یا چند صفحه موازی قرار داشتند. چنین می نماید که نخستین موتور این گروه را لالبن<sup>۴</sup> فرانسوی در نانت ساخته است. در طرح این موتور، وی از ماشین بخار براذرهود و وستینگهاوس الهام گرفته بود. فرنان فوره نیز در سال ۱۸۸۸ یک موتور ستاره ای با ۳۲ سیلندر طرح کرد که در چهار ستاره قرار داشتند، هشت سیلندر در هر صفحه. مؤسسه دیون-بوتون

در سال ۱۸۸۹ بوسیله آقای دولند، موتوری با ۱۲ سیلندر در یک صفحه ساخت که با هوا خنک می‌شد. از میان موتورهای دیگر ستاره‌ای این دوران می‌توان از موتور آنزانی<sup>۱</sup> با سه سیلندر با قدرت ۲۵ اسب نام برد که لویی بلریو آن را روی هواپیمای خود Blériot-XI کار گذاشت و با آن هواپیما در سال ۱۹۰۹ از روی مانش پرواز کرد.

موتورهای دورانی نخستین را آقای فلیکس میله فرانسوی در سال ۱۸۸۷ ساخت، موتوری با پنج سیلندر با اشتعال برقی و توزیع بوسیله کشویی گردان. این موتور روی یک سه‌چرخه و موتوسیكلت به‌کار گرفته شده بود. آقای لاورنس هارگریو<sup>۲</sup> استرالیایی نیز در همان سال برای هواپیما از آن استفاده کرد. بعدها موتورهای دورانی دیگری بوسیله دیون در ۱۸۸۹ و در همان سال آمده بوله پسر، ویل دانیل (۱۸۹۸) ساخته شدند.

یک موتور دورانی که اکثراً همچون نخستین ساخت صنعتی این نوع موتور شناخته شده است موتور Gnome ساخته لویی - لوران سگن، مهندس فرانسوی در سال ۱۹۰۸ می‌باشد. این موتور با ورود گازها از راه کارتر بوسیله یک سوپاپ اتوماتیک در پیستون و سوپاپ خروج گازهای سوخته شده در سرسیلندرها پیش‌بینی شده بود؛ و با هوا خنک می‌شد.

تکامل این موتور به موتور Gnome-Rhône با نه سیلندر به قدرت ۱۰۰ اسب برای وزن ۲۷۰ کیلوگرم انجامید، که می‌توان آن را رایج‌ترین موتور هواپیماهای متفقین در زمان جنگ جهانی اول دانست. ظاهراً این موتور با پایان گرفتن این جنگ به چند علت مکانیکی به کناری گذاشته شد. به نظر می‌رسد که بحض رفع مشکلات اصلی موتورهای چهارهنگامی با انواع فراوانی از راه‌حلها عرضه شدند، و مورد قبول قرار گرفتند. به مطالب گفته شده، این نکته را هم باید افزود که موتورهای به‌شکل X (ضربدری یا خاجی) و موتورهای به‌شکل Y با تعداد زیادی از سیلندرها در سال ۱۸۹۵ بوسیله فرنان فوره مورد مطالعه قرار گرفتند و در زمان جنگ جهانی اول، روی هواپیماها کار گذاشته شدند و نیز موتورهایی با پیستونهای متقابل که شرکت گویرون - بریلیه<sup>۳</sup> در سال ۱۸۹۹ کار زیادی روی آن انجام داد، اما رواج مورد انتظار را روی اتومبیلها نیافت.

اکثر این آزمایشها و نیز راه‌حلها، به هدف اصلی تأمین تعادل موتور و حذف لرزشهای آن در زمان کار توجه داشتند.

1. Anzani

۲. L.Hargrave. ۱۸۵۰ - ۱۹۱۵ در انگستان زاده شد، اما در ۱۸۶۶ به استرالیا رفت

3. Gobron-Brillié

میزان تراکم و افزایش فشار: میزان تراکم در موتورهای انفجاری اتومبیلها آهسته فزونی می‌گرفت؛ تقریباً از سه در موتورهای دایملر تا ۴ یا ۵ در موتورهای پایان جنگ جهانی اول. وانگهی میزان تراکم نمی‌توانست از این مرز، بسیار پایین، در آن وضع موتور و بنزین آن زمان، بالاتر رود زیرا خطر ترکش پدید می‌آمد.

کوششهایی هم روی باز و بسته شدن سوپاپها و سیستمهایی که اداره‌کننده این وظایف هستند به عمل آمد تا بهترین اجرای ممکن سیلندرها در مخلوط سوخت تأمین شود. در سال ۱۸۸۹ نخستین موتور چهار سیلندری خطی فوره دارای یک سوپاپ تنفسی بود که خودکار عمل می‌کرد و با کمی تأخیر بسته می‌شد. سپس، در آغاز این سده، تقریباً همه موتورهای اتومبیل به سیستم توزیع خودکار مجهز شدند. نخستین موتور چهار سوپاپی برای هر سیلندر (دو سوپاپ برای ورود و دو سوپاپ برای خروج) که هر چهار عدد آن از یک میل سوپاپ فرمان می‌گرفتند در سال ۱۹۱۴ بوسیله بوگاتی<sup>۱</sup> ساخته شد.

افزایش فشار، عملاً فقط پس از پایان جنگ جهانی اول به‌کار گرفته شد، درحالی‌که اصول و آزمایشهای اولیه در این باره، پینش از آغاز جنگ، شناخته شده بودند.

سوخت‌رسانی به‌کمک تلمبه، روشی کهن است، زیرا این روش در تعدادی از موتورهای بدون تراکم قبلی متعلق به دوران پیش از لنوار به‌کار رفته بود. بعدها در همه موتورهای دوهنگامی با تراکم قبلی که از کارتر به‌عنوان یک تلمبه استفاده می‌کردند یا خود تلمبه‌کمکی داشتند از این روش استفاده شد. حتی گفته شده است که موتورهای چهارهنگامی، نظیر *Standhur* نیز چنین بوده‌اند اما این نوع سوخت‌رسانی در فشارهایی عملی است که از فشار جو، به مقدار ناچیزی بیشتر باشند و نقش تلمبه بیشتر در روبش سیلندر از گازهای سوخته شده خلاصه می‌شود.

در موتورهای دوهنگامی که برای کار کردن، همواره به تلمبه نیاز دارند تشخیص یک موتور با تراکم از یک موتور دارای افزایش فشار، دشوار است؛ و تفاوت یک تلمبه روبشی با تلمبه فشار زیاد، تنها در مقدار فشار سوخت‌رسانی است.

بعدها قرارداد شد که چنانکه فشار سوخت‌رسانی از فشار هوا ۱۰٪ بیشتر نباشد بتوان آن را تلمبه روبشی نامید و اگر بیشتر باشد، یک تلمبه فشار زیاد است.

با چنین دیدی موتور دوهنگامی طرح آمده بوله، پسر، در ۱۸۹۵ را می‌توان همچون یکی از اولین موتورهای با فشار زیاد به‌شمار آورد. روبش گازهای سوخته شده بوسیله کارتر جای خود را به «پروانه سوخت‌رسانی» داد که بوسیله موتور گردانیده می‌شد.

در همین سال در انگلستان آقای ج. ه. همیلتون، افزایش فشار به موتورها را بررسی کرد. این بررسیها حدود سال ۱۹۰۵ بوسیله دوگلدیل کلرک و ا. بوجی<sup>۱</sup> ادامه یافتند. شخص اخیر برای به کار گرفتن یک دم توریینی، که گازهای خروجی آن را فعال می ساخت کوششهایی کرد. این سیستم با یک موتور دیزلی که برادران زولستر آن را در ۱۹۱۱ ساخته بودند انطباق داده شد.

اگوست راتو در سال ۱۹۱۶ نخستین موتور را با افزایش فشار ویژه هواپیما را، با یک کمپرسور توریینی که در ۳۰۰۰ دور در دقیقه ۵۰ اسب قدرت و ۲۳ کیلوگرم وزن داشت، ساخت. کمپرسورهای افزایش فشار نیز بوسیله محور محرک (اصلی) به طور مکانیکی فعال می شدند. این راه حل اقتصادتر بود. اما به هنگام کار کردن گرانتر تمام می شد. نخستین اختراعی که در این باره به ثبت رسید از آن پل دانیل در سال ۱۹۱۲ بود. این راه حل روی موتورهای احتراقی هواپیما پس از سال ۱۹۲۹ به کار گرفته شد با اینکه در آن زمان، حین جنگ جهانی اول شرکت های دایملر و بنز آزمایشهای آن را انجام داده بودند.

آلیاژهای آلومینیم: آلیاژهای سبک آلومینیم خیلی زود در ساختن بعضی قطعات موتور به کار گرفته شدند. حتی پیش از سال ۱۹۰۰ شرکت دیون - بوتون کارترهای بعضی از موتورهای اتومبیل یا هواپیمای خود را از آلومینیم می ساخت. پیستونهایی از آلیاژ آلومینیم حدود سالهای ۱۹۱۰ یا ۱۹۱۱ در موتورهای اتومبیلهای *Alphonse-XIII* که شرکت Hispano-Suiza آنها را می ساخت دیده شدند. نیروهای ماند (اینرسی) به طور قابل توجهی کم شده بودند. کاربرد آلیاژ بویژه برای موتورهای هواپیما و پیستونهای همه موتورهای خودرو، بزودی عمومیت یافت.

پیشرفت در ساخت اتومبیل: همه پیشرفتهای مربوط به موتورهای انفجاری در متن یک پیشرفت سریع صنعت ساخت اتومبیل از اواخر سده نوزدهم و هواپیماسازی از پایان دهه نخست سده بیستم بوده است.

در آلمان، سازندگان دایملر و مایباخ در سال ۱۸۹۰ شرکت *Daimler Motoren Gesellschaft AG* را تأسیس کردند. مایباخ در سال ۱۹۰۰ نخستین مرسدس را ساخت و بنز به ساختن خودرو در کارخانجات خود *Benz & Cie Rheinische Automobil und Motorenfabrik AG* ادامه داد. آدام اوپل<sup>۲</sup> شرکت اوپل را در روسلس هایم<sup>۳</sup> تأسیس کرد و از سال ۱۸۹۸ به ساخت خودرو پرداخت.

در فرانسه، نخستین کشوری که تولید اتومبیل برای فروش در آن ایجاد شده بود: پنار - لواسور

1. A.Büchi    2. Adam Opel

۳. Russelsheim شهری در ایالت هسه در کنار ماین در آلمان.

نخستین مؤسسه‌ای بود که وارد این میدان شد و سلطهٔ تولید جهانی اتومبیل را تا سال ۱۹۰۰ در دست داشت. پژو و شرکا که در ۱۸۹۱ به «Les fils de Peugeot frères» تغییر نام یافت پس از رها کردن تولید ماشینهای بخار، دومین سازندهٔ خودروهای بنزینی شد. مؤسسه دیون - بوتون نیز ساخت موتورهای بخاری را رها کرد و از سال ۱۸۹۴ به تولید اتومبیل پرداخت. مؤسسه برادران رنو پس از اینکه لویی رنو در سال ۱۸۹۸ نخستین خودرو خود را، که با موتور دیون - بوتون و نیز جعبه دنده بی‌واسطه و انتقال حرکت بوسیله محور و دیفرانسیل مجهز شده بود ساخت، در سال ۱۸۹۹ تشکیل شد.

در انگلستان وجود فرمان «Locomotive Act» که تنها در سال ۱۸۹۶ پس گرفته شد مقرر می‌داشت که در پیشاپیش هر خودروی که حرکت می‌کند یک نفر پیاده با پرچم قرمز کوچکی حرکت کند، همین امر تا این تاریخ پیشرفت اتومبیل‌سازی را فلج کرده بود. آقای ف. ر. سیمز که جواز ساخت از دایملر داشت حدود سال ۱۸۹۶ شرکت The Daimler Motor Company را تشکیل داد. نخستین خودرو به سبک انگلیسی را آقای ف. و. لنچستر در ۱۸۹۶ ساخت. پس از آن مؤسسات متعدد اتومبیل‌سازی تشکیل شدند که از آن میان می‌توان از: ۱۸۹۸ Percy Riley، ۱۸۹۹ Humbers، ۱۹۰۲ Singer، ۱۹۰۳ Wauxhall، ۱۹۰۳ Rover، ۱۹۰۴ Rolls-Royce، ۱۹۰۶ Austin، Hillman و غیره نام برد.

در ممالک متحده آمریکا، برادران چارلز و فرانک دوریه<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۳ در ماساچوستس خودرویی ساخته بودند که با یک موتور بنزینی دوهنگامی حرکت می‌کرد؛ و بعد در ۱۸۹۵ خودروی دیگری ساختند که موتور چهارهنگامی داشت، اینان به عنوان نخستین اتومبیل‌سازان شناخته شدند. پس از سال ۱۸۹۷ بود که تولید اتومبیل برای فروش بوسیله شرکت‌های: Pope Manufacturing واقع در هارتفورد و شرکت Winton Motor Carriage در کلیولند آغاز شد. در سال بعد، ۱۸۹۸، در این کشور حدود ۵۰ مؤسسه اتومبیل‌ساز بود. از آغاز ۱۸۹۹ نامهای بزرگ آینده این صنعت درخشیدند که از آن جمله می‌توان از مؤسسات زیر نام برد: ۱۸۹۹ Olds Motor Works که آقای رنسام ایلی اولدرز<sup>۲</sup> آن را پایه گذارد؛ Packard در ۱۹۰۰ که جیمز و. پاکارد مؤسس آن بود؛ مؤسسه Cadillac در ۱۹۰۲ از هنری لیلند<sup>۳</sup> و فالکونر<sup>۴</sup>؛ Buick در ۱۹۰۲ و Ford در ۱۹۰۳.

هنری فورد در ۱۸۹۶ در دترویت نخستین خودروی خود را روبراه کرد. موتور این خودرو

چهارهنگامی بود و دو سیلندر داشت؛ آن را کین پنینگتون<sup>۱</sup> ساخته بود. شرکت فورد به سرعت به روش تولید انبوه خودروهای بزرگ روی آورد، این روش از سال ۱۹۰۸ با مدل فورد T آغاز شد. ماشین‌سازان بزرگ دیگر از جمله هنری لیلند، جیمز پاکارد بیشتر به کیفیت کار توجه داشتند. مؤسسه General Motors Company که بعدها غول آسا شد، در سال ۱۹۰۸ به توسط آقای ویلیام دورانت<sup>۲</sup> از اجتماع چندین شرکت: بیوک، اولدزمبیل، کادیلاک، اوکلند و پونتیاک تأسیس شد. در کشورهای دیگر، مثلاً ایتالیا (فیات در سال ۱۸۹۹ تأسیس شد)، استرالیا، کانادا، سوئد، روسیه، دانمارک شرکت‌های اتومبیل‌سازی بزودی برپا شدند. در سال ۱۹۰۰ شمار مدل‌های اتومبیلها ۲۰۹ عدد بود اما این تعداد در ۱۹۰۵ به ۷۰۰ رسید.

مبانی ساخت وسایل فضاوردی: صنعت فضاوردی در فرانسه پیشرفت سریعی داشت. نخستین نمایشگاه بین‌المللی فضاوردی در سال ۱۹۰۸ در پاریس برپا شد و بدین مناسبت ۱۵ مدل موتور هواپیما، که بیشتر آنها ساخت فرانسه بودند به نمایش گذارده شدند، که از آن میان می‌توان از: موتور Antoinette، لئون لوواسور<sup>۳</sup> و موتورهای باریکان<sup>۴</sup> و ماره<sup>۵</sup>، آقایان داراک<sup>۶</sup>، رنو، اسنو-پلتری (روبر)<sup>۷</sup>، فارکو، بوشه<sup>۸</sup>، سگن و غیره نام برد.

سازندگان اولیه هواپیما در مقیاس صنعتی در فرانسه به سال ۱۹۰۸ پدید آمدند. از نخستین آنها می‌توان از برادران ووزان (گابریل و شارل) در بیانکور<sup>۹</sup>، برادران فرمن (هانری و موریس)، و لویی بلریو نام برد. در همان زمان در امریکا برادران رایت، در اتریش آنتولی فوکر<sup>۱۰</sup>، در رومانی تریان وویا<sup>۱۱</sup> و اورل ولایو<sup>۱۲</sup> و در روسیه ایگور سیکورسکی<sup>۱۳</sup> به ساختن هواپیما پرداختند.

دوران خوش موتورهای بنزینی: می‌توان گفت که همه ترکیبات احتمالی مربوط به موتورهای بنزینی و به‌طورکلی مربوط به اتومبیل تا پیش از سال ۱۹۱۴ مورد بررسی قرار گرفته بود. تکانی که جنگ جهانی اول به کاربرد موتورهای بنزینی داد بسیار قاطع بود. از همان پایان مخاصمات اتومبیل وسیله‌ای فردی شده بود و تا بیست سال برتری خود را از هر لحاظ حفظ کرد. هواپیما که قبلاً نوعی وسیله ورزشی شمرده می‌شد بوسیله حمل و نقل تبدیل گردید و در آستانه جنگ جهانی دوم از فراز اقیانوسها می‌گذشت و آینده کشتیها مسافری را تهدید می‌کرد.

پیشرفتهایی که از حدود سال ۱۹۲۰ تا کنون در طراحی و ساخت موتوری بنزینی به‌وقوع پیوسته است تنها به کاربرد هرچه عاقلانه‌تر از همه چیزهایی که در دهه‌های نخست این تکنیک

- |                    |                   |                        |                  |
|--------------------|-------------------|------------------------|------------------|
| 1. Kane Pennington | 2. William Durant | 3. L. Levavasseur      | 4. Bariquand     |
| 5. Marre           | 6. Darracq        | 7. R. Esnault-Pelterie | 8. Buchet        |
| 9. Billancourt     | 10. A. Fokker     | 11. Traian Vuia        | 12. Aurel Vlaiey |
|                    |                   | 13. J. Sikorsky        |                  |

پیشنهاد و یا آزمایش شده‌اند، مربوط می‌شوند. واقعیت بسیار جالب بدون تردید تحول بسیار برجسته موتورهای هواپیماست که به‌طور روزافزونی از موتورهای اتومبیل فاصله می‌گیرند.

نخست باید پذیرفت که افزایش قدرت موتورهای هواپیما را تنها مشکلات مربوط به ساخت و کار آن محدود می‌سازند و سرعت هواپیما - لااقل نوع ملخدار - عملاً هیچ مرزی نمی‌شناسد. اما سرعت اتومبیل به‌علت عوارض مادی، که شرح جزئیات آنها سودی ندارد، همیشه محدود بوده است.

افزایش توان ویژه که همیشه مورد علاقه سازندگان بوده است در موتورهای هواپیما پیشرفت چشمگیری داشت. پس از پایان گرفتن جنگ جهانی اول، توان موتور به ۴۰۰ اسب، یا برای هر اسب به ۱/۵ کیلوگرم رسیده بود و در پایان جنگ جهانی دوم این ارقام به ۱۲۰۰۰ اسب و ۰/۵ کیلوگرم برای هر اسب رسید. همین وضع برای سیلندرها و توان ویژه برقرار بود. افزایش توان ویژه با زیاد کردن میزان تراکم و افزایش فشار، که برای موتورهای هواپیماهایی که در ارتفاع زیاد پرواز می‌کنند ضروری است، حاصل شد.

مشکل احتراق ترکشی: تعمیم این دو وسیله، بی‌درنگ به چند دشواری فنی انجامید که در دوران قبل، به زحمت پیش می‌آمدند و هیچ وسیله مؤثری برای رفع آنها در دسترس نبود. مسأله مربوط به پدیده‌های ترکش می‌شد که یا طی تراکم، خود اشتعالی، یا در جریان احتراق ایجاد می‌شد. از بین بردن این پدیده‌ها دو راه داشت: سازگار کردن مشخصات سوختها و اصلاح موتورها.

در طی سالهای ۲۰ این سده، مخلوط کردن بنزین با «مواد ضد ترکش» شروع شد. نخستین ماده ضد ترکشی که شناخته شد، تترااتیل سرب بود. رفته‌رفته روشهای تقطیر و دستکاری فراورده‌های نفتی بهتر شدند. روشهای کراکینگ (مولکول‌شکنی) حرارتی حدود سال ۱۹۲۵ تکمیل شد تا به نیازهای تازه به بنزین سبک پاسخ دهند. ده سال پس از آن روش کراکینگ کاتالیتی یوجین هودی<sup>۱</sup>، ابداع و در امریکا در مقیاس صنعتی به‌کار گرفته شد.

استفاده از کاتالیزور برای کراکینگ به بهترین شکل، در سالهای ۹۱۵-۱۹۱۶ به ابتکار ا. م. مک‌آفی<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. این شخص از نمک بی‌آب کلروآلومینیم به‌عنوان کاتالیزور استفاده می‌کرد. اما این کاتالیزور بسرعت بی‌اثر می‌شد و نمی‌توانستند آن را دوباره فعال سازند. طی سالهای ۲۰، هودی کار خود را شروع کرد، نخست در فرانسه، برای یافتن روشی برای تولید سوخت ترکش‌ناپذیر. روشهای کاربرد کاتالیزورها در آن زمان ترقی سریعی یافت. باین‌حال، این تحقیقات، چند سال پس از بازگشت هودی به امریکا، باز هم ادامه داشت و بخاطر سودی که



چند شرکت صنعتی از آن چشم داشتند، دنبال شد. هودری با کاربرد نیکی که با روش متناوب «بستر ثابت» آن را احیا می‌کرد به نتیجه رضایتبخشی رسید. پس از سال ۱۹۳۵، انواع گوناگونی از روش هودری، به اصطلاح «بستر سیال» یا «بستر متناوب» - برحسب روشی که برای احیای بستر کاتالیزور به کار گرفته می‌شد - پیاپی مورد استفاده قرار گرفتند. مجموعه روشهای مولکول شکنی کاتالیتی، با امکان تهیه مستقیم بنزینهای عالی برای هواپیما، مزایای بزرگی داشتند. این را می‌توان مهمترین تغییر شکلی دانست که در تصرفهای فرآورده‌های نفتی در زمانی ایجاد شد که کاربرد آنها وارد مرحله بسیار گسترده‌ای شده بود.

طی همین دوران بود که مفهوم عدد اوکتان برای نشان دادن کیفیت یک سوخت در تحمل فشاری بیش و کم بالا شناخته شد. مخلوطی با نسبتهای متغیر از دو هیدروکربن سیر شده، هپتان، بسیار ترکشی، که تنها با عدد ۵ نشان داده می‌شد و ایزواوکتان که با عدد ۱۰۰ نمایش داشت را به عنوان سیستم مبنا پذیرفتند. همچنین لازم بود که برای تعیین عدد یک سوخت نسبت به مخلوطی از دو هیدروکربن مبنا، موتورهای ویژه‌ای ابداع کرد. عدد اوکتان بهترین سوختها در حوالی سال ۱۹۲۰ برابر ۵۰ بود (ترکیبی مانند مخلوطی از ۵۰٪ هپتان و ۵۰٪ ایزوکتان) توانست در حوالی سال ۱۹۲۵ با افزودن تترااتیل سرب به ۷۵ و در ۱۹۳۵ به ۸۵ برسد.

در رشته مربوط به اصلاح موتور، کوششهای روی محفظه احتراق متمرکز شد، قسمتی که در ۱۹۱۹ مورد بررسی هری ریکاردو<sup>۱</sup> بود و نیز روی سیستم خنک کردن سر سیلندرها. ساختمان سرسیلندره‌های ضد ترکش از آلیاژ آلومینیم با گرمارسانایی زیاد، نخستین بار بوسیله آقای کازت<sup>۲</sup> مهندس فرانسوی در سال ۱۹۳۰ انجام گرفت و می‌توان آن را در فرآیند مبارزه با ترکش، یک مرحله به‌شمار آورد.

برای گریز از پدیده‌های ترکش، با تعویض روش سوخت‌رسانی از طریق کاربوراتور به سوخت‌رسانی تزریقی هم کوششهایی به عمل آمد. این روش از موتورهایی که با سوخت سنگین کار می‌کردند - دیزلها، که بعد درباره آنها سخن خواهیم گفت - الهام شد و در آغاز این سده مورد آزمایش قرار گرفت. اما تنها حدود سال ۱۹۳۴ و نخست برای موتور هواپیما پذیرفته شد و در این سال آقای ویوله مهندس فرانسوی سوخت را مستقیماً در سیلندره‌های موتور هواپیما تزریق کرد و در همین زمان آقای لوزه<sup>۳</sup> که او هم فرانسوی بود تزریق را در مجراهای ورود سوخت انجام داد.

آخرین مراحل تکمیل: در چارچوب این اثر نمی‌توان همه تحولات موتورهای بنزینی طی سی یا چهل سال اخیر را دنبال کرد. می‌توان گفت که مشخصه آن، پذیرش و به کاراندازی همه راه‌حلهایی

بود که در دوره پیش آزمایش شده بودند؛ مثلاً ساختمان و کار کاربوراتورها، سیستمهای توزیع با سوپاپ و بدون سوپاپ، انواع آرایش حرکتی و شمار دیگری از دشواریها، توجه سازندگان را، برای پاسخگویی به نیازهای جدید و بویژه نیازهای موتور هواپیما، یا برای عقب نماندن رقابتهای بازرگانی به خود جلب کرده بود.

مهمترین تحولی که ایجاد شد محققاً مربوط به موتور هواپیماست. پس از کنار گذاشتن موتورهای دورانی، موتور V شکل است که تا پایان جنگ دوم جهانی اوج می‌گرفت با این حال، موتور ستاره‌ای، غیردورانی، بکلی کنار گذاشته نشد. آقای لیندبرگ<sup>۱</sup> با یک موتور ستاره‌ای رایت که ۹ سیلندر و ۲۰۰ اسب قدرت داشت توانست در ۲۱ ماه مه ۱۹۲۷ برای نخستین بار از روی اقیانوس اطلس پرواز کند. در دوران جنگ دوم جهانی، موتورهای ستاره‌ای تا ۴۲ سیلندر که در ۶ ستاره مرتب شده بودند هم وجود داشتند. موتورهای با سیلندرهایی متقابل، موتورهای X و W شکل هم در هواپیماها به‌کار گرفته شدند.

اما حادثه بسیار بزرگ، پس از همه این پیشرفتهای فنی، حذف سریع موتورهای پیستونی برای هواپیماها، با آغاز کاربرد موتورهای واکنشی بود، که بعدها بررسی خواهند شد. پس از سال ۱۹۶۰ موتورهای پیستونی تنها در هلیکوپترها و هواپیماهای توریستی مورد استفاده قرار گرفتند. موتورهای اتومبیل راه دیگری در پیش داشتند زیرا مشکل اساسی آنها، ایجاد قدرتهای بسیار زیاد نبود. گرایش کلی طبیعتاً افزایش سرعت گردش میل لنگ موتور بود، گرایشی که حتی در نوع تولید انبوه هم وجود داشت. در این زمینه به میانگین از ۵۰۰۰ دور در دقیقه به ۱۰ تا ۱۴ هزار دور در دقیقه برای اتومبیلهای کورسی دست یافتند. در عوض می‌بایست دشواریهای تازه را پشت سر می‌گذاشتند: فرسایش سریع، کمی سوخت‌رسانی، لرزهای مکانیکی.

گرایش تکمیلی دیگری که سرعت گسترش یافت: ساختن موتورهای به اصطلاح «مربعی» بود. در گذشته نسبت قطر پیستون به طول مسیر حرکت آن همیشه بیشتر از ۱ بوده است. در سالهای ۳۰ این نسبت تقریباً ۱/۵ بود. پس از ۱۹۵۰ این نسبت عموماً از ۱ کمتر شد و در شماری از اتومبیلها به ۰/۶ رسید. افزایش سرعت گردش میل لنگ، دیگر مسبب افزایش سرعت خطی پیستون نبود. در برهه ۱۹۵۰ - ۱۹۶۰ سرعت گردش موتورهای امریکایی ۲۵٪ افزایش یافت، و حال آنکه سرعت خطی پیستون فقط از ۱۳/۵ به ۱۲/۵ متر در ثانیه رسید.

برای افزایش میزان فشار در سیلندرها به تحقیق درباره انواع تازه محفظه احتراق پرداختند. برای اینکه فشار از ۸ بالاتر رود محفظه احتراق I، که حاصل کارهای ریکاردو بود با سوپاپهای Lindbergh<sup>۱</sup> چارلز اوگاستس ۱۹۰۲ - ۱۹۷۴ که در ۱۹۲۷ از نیویورک به پاریس پرواز کرد.

جانبی، دیگر مناسب نبودند و لاجرم محفظه‌های نوع خاردار و از نوع نیمکره‌ای که سوپاپهای آنها در سر سیلندرها جای داشتند مورد استفاده قرار گرفتند. این سیستم عمومیت یافت و سوپاپها تا سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه از شاتون و انگشتی یا بادامک سوپاپ فرمان می‌گرفتند یا برای هر سرعتی، مستقیماً از میل سوپاپ. همه این اصلاحات و نیز دستکاریهای دیگر امکان بالا بردن بسیار زیاد توان ویژه موتور را فراهم ساختند. گرچه در پایان جنگ جهانی دوم قدرت موتورهای هواپیما به ۵۰ اسب برای هر ۱۰۰۰ سانتیمترمکعب رسید، بیست سال بعد، این ارقام به موتورهای اتومبیل مربوط می‌شد و قدرت ۱۰۰ اسب برای هر لیتر، ویژه موتورهای نمایشی بود و حتی قدرت بعضی اتومبیلها به ۶۰ اسب هم رسید.

آرایش حرکتی موتورها زیاد تغییر نکرد، تنها آرایش خطی هشت سیلندر کنار گذاشته شد. آماری از سال ۱۹۶۸ تمایلات مردم را در این دوره نشان می‌دهد: برای موتورهای اتومبیل: ۵۳/۵٪ دارای سیلندره‌های خطی، ۳۲/۵٪ دارای سیلندره‌های خورجینی و ۱۴٪ با سیلندره‌های متقابل بود. در مورد تعداد سیلندرها، همین منبع اطلاعات تخمینی زیر را می‌دهد: ۴۰/۵٪ چهار سیلندر، ۲۸/۵٪ هشت سیلندر، ۲۴/۵٪ شش سیلندر، ۶/۵٪ دو سیلندر و ۱٪ موتورها سه سیلندر داشتند. بالاخره باید توجه داد که موتورهای دوهنگامی که از آغاز این سده کنار گذاشته شده بودند بشدت رواج یافتند؛ همین‌طور موتور ساخت ف. ونکل<sup>۱</sup> و موتور با پیستون دورانی که اندیشه آن به پیش از سال ۱۹۰۰ مربوط می‌شد.

طبیعی است که همگام با پیشرفت متالورژی از جهت سبکی وزن و مقاومت، مصالح ساختمانی موتورها هم متحول شود. آلیاژهای آلومینیم و سیلسیم به گستردگی جای چدن معمولی را برای ساختن سیلندره‌های موتور و سرسیلندرها گرفتند و چدن گره‌ای (چدن با گرافیت دانه‌ای) جانشین فولاد در میل‌لنگ‌سازی شد و ...

به موازات این تحول، تکنیک‌های پالایش نفت، تولید سوخته‌های با عدد اوکتان ۱۰۰ و حتی بالاتر از آن را برای اتومبیلهای مسابقه، ممکن ساخت. بالاخره، الکترونیک هم در بهتر کردن بعضی کارها نظیر کنترل تزریق و اشتعال سهیم شد. در سیستمهای ترانزیستوری، کلید قطع و وصل بکلی حذف شد و نوعی ضربانگر مغناطیسی که در توزیع‌کننده جاگذاری می‌شد وظیفه آن را به عهده گرفت. یک مورد فنی سیر شده اما کهنه نشده: موتورهای پیستوندار بنزینی حدود سال ۱۹۷۰ یک مورد فنی بودند که به نظر می‌آمد که دیگر، حتی در دستکاریهای ظاهری هم نمی‌توان انتظار تغییرات بنیادین در آنها داشت. حداقل یک سده است که چنین می‌نماید که این موردی است که تکامل

آن به پایان رسیده است و همه بخشهای تحویلپذیر آن تقریباً به طور کامل سیر شده‌اند. به یاد داریم که ماشین بخار نیز در آغاز سدهٔ معاصر به این مرحله رسید. اما در حال حاضر، موتور پیستوندار را در کار اصلی خود، یعنی خودروی تک‌نفری یا خانوادگی، به جانشینی تهدید نمی‌کند. این وسیله مانند دیگر وسایل فنی این سده، نشانهٔ نوعی روش زندگی شده است و بی‌تردید آرزوی همه کسانی است که به علل گوناگون از کمبودهای کم‌وبیش جدی آن رنج می‌برند.

### موتور دیزل

تاریخ موتور دیزل بسیار پیچیده است زیرا می‌توان نشان داد که هیچ‌یک از وسایلی که رودلف دیزل به‌کارگرفت متعلق به خود وی نبوده‌اند و پیش از او معاصرانش جداگانه از آنها استفاده کرده بودند، امتیاز بی‌چون‌وچرای دیزل در روش اشتعال سوخت در نتیجهٔ تنها تأثیر حرارت برخاسته از تراکم هواست که سوخت در آن تزریق می‌شود. اما مرز کاربرد اکید این اصل و استفاده از راههایی گوناگون برای ایجاد اشتعال - مثلاً اینکه جداریک محفظهٔ احتراق جداگانه، یا محفظهٔ پیش از احتراق، از بیرون گرم شود - هیچ‌گاه روشن نبوده است، بنابراین، گفت‌وگو دربارهٔ موتورهای دیزل و نیم دیزل دهها سال ادامه یافت. سرانجام، گرچه رودلف دیزل با راه‌انداختن موتوری با نام خود، کار را تمام کرد بزودی معلوم شد که اصولی که در آغاز مبنای کار وی بودند و نیز کارهای تحقیقی وی در عمل به جایی نمی‌رسید، به‌طوری‌که ارزش اختراعات ثبت‌شدهٔ وی مورد تردید قرار گرفت. بهر تقدیر، باید پذیرفت که این موتور بالاخره نام رودلف دیزل را بر خود دارد و از اواسط سدهٔ بیستم یکی از رایجترین موتورهای زمان ماست.

پیدایش موتور دیزل را می‌توان حادثه‌ای، با اهمیت پیدایش موتورهای با تراکم قبلی دانست. از نظر تاریخی این امر در همان خطی از پیشرفته‌ها قرار دارد که در پی آن است که با بالا بردن میزان تراکم، بازده موتور را افزایش دهد. در موتور دیزل این تمایل به جایی رسید که با گرمایی که تنها برخاسته از تراکم هوا بود سوخت مشتعل می‌شد.

پیش نمونه‌ها: از امتیازات موتورهای دیزل، یکی استفاده از مشتقات سنگین تقطیر نفت و ادامهٔ احتراق با فشار ثابت است. حدود بیست سال پیش از آنکه دیزل کار خود را آغاز کند، این خصوصیات در سال ۱۸۷۳ بوسیلهٔ بریتون، که قبلاً دربارهٔ وی سخن رفته است، مورد استفاده قرار گرفت. این عصری بود که همان‌طور که دیده شد، برای موتورهای جدید درونسوز، همه سوخته‌های محتمل و بویژه هیدروکربنهای سنگین که ارزان قیمت بودند به‌طور سیستماتیک مورد آزمایش قرار

می‌گرفتند.

گرایش اخیر، بویژه پس از ۱۸۸۵ اوج گرفت. برای این کار می‌بایست به سیستمی از تغذیه بیاندیشند که مخلوطی از هوا و سوخت کافی، با مواد کم فرار به‌دست دهد. بنابراین، انواع گوناگونی از «تبخیرکننده‌ها» ساخته شدند. نمونه‌های اولیه آنها نخست بیرون از سیلندر کار گذاشته می‌شدند و شعله‌ای آنها را گرم می‌کرد، کاری که در سال ۱۸۷۷ Société des moteurs انجام داد یا بوسیله گازهای خروجی، که در سال ۱۸۸۹ پرستمان آن را عملی کرد. بعداً آنها را داخل سیلندرها کردند تا در معرض گرمای ناشی از احتراق مخلوط سوختی باشد، کاری که در ۱۸۸۸ دویتس و بعداً کمبل<sup>۱</sup> و آکروید - استوارت<sup>۲</sup> انجام دادند. از تزریق هم استفاده می‌شد، اما این کار در مرحله ورود سوخت و همراه با فشار کم بود. این روش در نقطه مقابل طرزکاری بود که بعدها برای موتورهای دیزل پذیرفته شد. حتی ترکیهایی از تبخیرکننده و انژکتور به‌کار گرفته شدند. بررسیهایی گوناگونی که برای حل این مسأله انجام گرفت، انگیزه ساخت وسایل گوناگون در مدت زمان کمی بود.

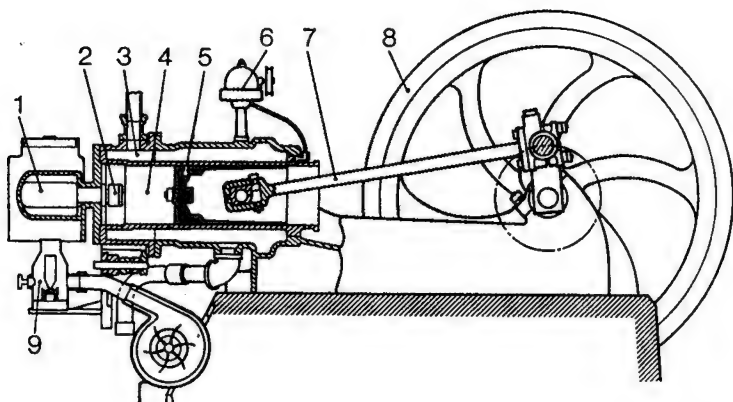
از جمله موتورسازانی که در اواخر سده نوزدهم در پی استفاده از هیدروکربنهای سنگین در موتورهای احتراقی برآمدند می‌توان از آلمانیها: کاپیتاین<sup>۳</sup>، برادران اشپیل، برادران کورتینگ و از انگلستان: پریتسمان<sup>۴</sup> کراسلی، آکروید - استوارت، هورنسبای و از فرانسویان: ایل<sup>۵</sup>، لواسور، و از امریکاییان: بریتون را نام برد. همه این موتورها بخصوص در برهه سالهای ۱۸۸۵ - ۱۹۱۰ ساخته شدند و موفقیت آنها چنان بود که در آن هنگام می‌شد پیش‌بینی کرد که آینده از آنهاست.

موتورهای آکروید - استوارت: این موتورها در میان همه انواع آنها، چه از نظر کیفیت خاصی که داشتند و چه بدین علت که بعضی از مشخصات آنها به موتورهای دیزل بسیار نزدیک بود و تا امروز هم به چشم اجداد موتورهای دیزل به آنها می‌نگرند، جای خاصی دارند. در واقع این موتورها یک محفظه پیش از احتراق داشتند و با هیدروکربنهای سنگین کار می‌کردند و جالب اینکه آقای آکروید - استوارت از همان نخستین ثبت اختراع خود در ۱۸۹۰ پیش‌بینی کرد که این سوخت باید در محفظه پیش از احتراق، در پایان حرکت تراکمی، تزریق شود؛ اصلی که بعدها عملی شد.

موتورهای نخستین آکروید - استوارت را شرکت هورنسبای و پسران واقع در گرانشم<sup>۶</sup> انگلستان ساختند. در این موتورها تزریق سوخت بوسیله تلمبه‌ای با فشار کم در محفظه پیش از احتراق، اما در حین ورود سوخت انجام می‌گرفت. سوخت تحت تأثیر گرمای احتراق پیشین که جداری از ماده عایق حرارت، آن را نگاهداشته بود، تبخیر می‌شد. بخار سوخت در تماس با جدار داغ محفظه

1. Campbel 2. Ackroyd-Stuart 3. Capitaine 4. Priestmann 5. Hiel

۶. Grantham شهری در لینکلن شایر، کنار رودخانه ویشم در غرب انگلستان.



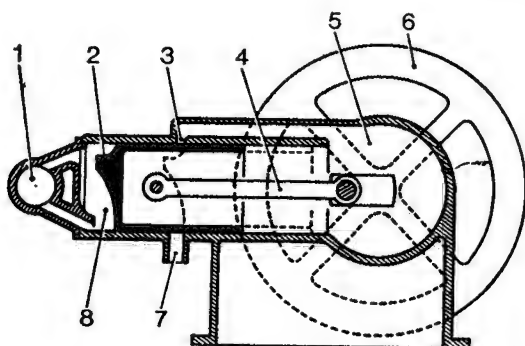
شکل ۸۷. موتور آکروید - استوارت (۱۸۹۰).

۱. محفظه پیش احتراق؛ ۲. سوپاپهای ورود هوا و تخلیه؛ ۳. مکانیزم خنک‌سازی با آب؛ ۴. سیلندر؛ ۵. پیستون؛ ۶. وسیله روغنکاری؛ ۷. شاتون؛ ۸. چرخ طیار؛ ۹. وسیله گرم کردن شعله‌ای محفظه پیش احتراق.

پیش احتراق، زمانی که هوای تحت فشار سیلندر به آن وارد می‌شد مشتعل می‌گردید، سپس کار سوخت، در سیلندر به انجام می‌رسید (شکل ۸۷). این موتورها پس از مدت کمی متحول شدند. عمل تزریق در اواخر حرکت تراکمی انجام گرفت. همچنین موتورهای ساخته شد که بعدها آنها را نیم دیزل نامیدند و عمل اشتعال در آنها بوسیله «گلوله داغ» محفظه پیش احتراق، انجام می‌گرفت و نه مثل موتور دیزل، تنها تحت تأثیر گرمای ناشی از تراکم هوا در سیلندر. در نیم دیزلها، در واقع میزان تراکم آن‌قدرها بالا نیست که بدون یک منبع حرارتی کمکی ایجاد اشتعال شود. همه این انواع موتورها غالباً با یکدیگر مشتبه می‌شوند و تفاوت چرخه‌های کاری آنها، خوراک جروبچه‌های آن دوره بود.

یکی از نخستین موتورهای نیم دیزل دوره نخست که موفقیت درخشانی به دست آورد موتور ساخت ف. س. هیرش<sup>۱</sup> به سال ۱۸۹۹ بود. دو سال بعد در نخستین کشتی مجهز با موتور درونسوز گذاشته شد و این کشتی اقیانوس اطلس را پشت سر گذاشت. موتورهای نیم دیزل دوهنگامی که از موتورهای آکروید - استوارت اقتباس شده بودند و در سال ۱۹۰۲ بوسیله روندولف<sup>۲</sup> مهندس سوئدی ساخته شدند تحت نام موتورهای گلوله داغ، موفقیت دراز مدتی به چنگ آوردند (شکل ۸۸). این نوع موتورها بویژه در کشتیهای صیادی، کارگاههای جنگلی یا ساختمانها به کار گرفته شدند

1. F. C. Hirsch    2. Rundölf



شکل ۸۸. موتور گلوله داغ روندولف (۱۹۰۲).

۱. گلوله داغ؛ ۲. پیستون؛ ۳. روزنه ورود؛ ۴. شاتون؛ ۵. کارت؛ ۶. چرخ طیار؛ ۷. روزنه تخلیه؛ ۸. سیلندر.

و تا پایان جنگ دوم جهانی از آنها استفاده می‌شد.

موتور دیزل طرحهای اولیه: رودلف دیزل، مهندس دانشکده فنی مونیخ، در همان سال ۱۸۸۸ در اندیشه ساختن موتوری بود که بتواند جانشین ماشین بخار شود. وی در آن زمان ۲۲ سال داشت. این موتور ۷۵ سال بعد یکی از جانشینان عمده ماشین بخار پیستونی شد. این نماینده شرکت ماشینهای یخسازی در پاریس که از روشهای پرفسور پیشین خود کارل فون لینده استفاده می‌کرد، در آغاز طرح یک موتور آمونیاکی را پیشنهاد کرد و مدل کوچکی از آن را در سال ۱۸۸۷ ساخت. نفوذ افکار لینده در دیزل در این امر آشکار می‌شود که دیزل نخستین مهندسی بود که برای طرح و محاسبه یک موتور درونسوز به ترمودینامیک روی آورد. هدف وی ساخت نوعی موتور حرارتی بود که بر پایه سیکل کارنو کار کند - سیکلی که حداکثر بازده را می‌دهد. دیزل در ۲۳ فوریه ۱۸۹۲ نخستین امتیاز اختراع خود را، که شامل عملی کردن این سیکل با چهار هنگام زیر می‌شد، در آلمان به ثبت رسانید:

۱° مکش هوا در سیلندر؛

۲° تراکم، نخست در دمای ثابت (۱) تا حدود ۳ اتمسفر، با تزریق آب برای جلوگیری از بالا

رفتن دما، سپس آدیاباتیک (۱) طی بقیه حرکت پیستون تا ۱۲۵° اتمسفر در ۸۰° درجه؛

۳° دتانت، نخست در دمای ثابت تا ۹۰ اتمسفر برای تزریق و احتراق سوخت؛ افزایش حجم

از بالا رفتن دما جلو می‌گیرد، سپس آدیاباتیک از ۹۰ به یک اتمسفر؛

۴°، تخلیه گازهای سوخته شده که در اثر دتانت تا دمای محیط سرد شده‌اند.

آقای دیزل در سال بعد، طی جزوه‌ای افکار خود را منتشر ساخت اما متأسفانه در آن خطایی راه یافته بود که پیش‌بینی می‌کرد که سیکل شرح داده شده بازدهی بیشتر از سیکل کارنو را ممکن می‌سازد - چیزی که ناممکن بود.

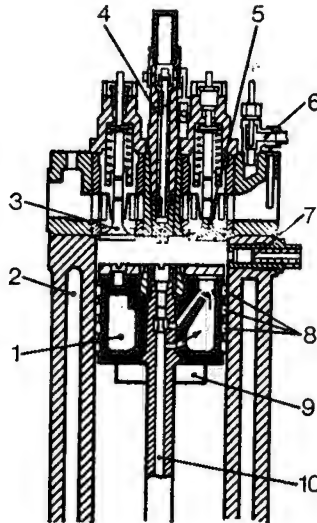
آقای دیزل به برکت قراردادهایی که با مؤسسه Maschinenfabrik Augsburg. که بعدها نام آن MAN شد، متعلق به فریدریک کروپ، مؤسسه سوییسی زولتسر امضا کرد توانست در آوگسبورگ<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۳ نخستین مدل خود را بسازد، طبق تئوری وی، وسیله‌ای برای خنک‌سازی وجود نداشت، محفظه احتراق در خود پیستون بود و تزریق می‌بایست به‌طور مکانیکی با یک تلمبه انجام گیرد. این موتور کار نکرد و با موتور کمکی یدک شد. این امر به آزمایشها امکان داد تا ثابت کنند که فشار فقط تا ۳۳ اتمسفر بالا می‌رود.

مرحله دوم تحقیقات: نتیجه ملموس این مرحله نخست برای دیزل این بود که متوجه شد که سیکل کارنو به علت فشار بسیار بالایی که بدان نیازمند است، عملی نیست. وی در ماه نوامبر ۱۸۹۳ به اختراع خود ملحقه‌ای افزود. دومین هنگام سیکل کار، فقط شامل فشار آدیاباتیک هواست و سومین هنگام، شامل احتراقی با فشار ثابت، که یک دتانت آدیاباتیک در اواخر حرکت پیستون به دنبال دارد. اشتعال سوخت همیشه به علت گرمای برخاسته از فشردگی هوا بود. هنگامهای نخست و چهارم بهتر نشده بودند. هوا فقط تا ۳۰ اتمسفر فشرده شده بود. نام وی با این سیکل تازه بلند آوازه شد. در همین سال علیه افکار دیزل انتقادهای بسیار تندی برخاست، نخست برای اینکه وی عقاید خود را تغییر داده بود، دوم برای اینکه، آن‌طور که گفته می‌شد، هیچ‌کدام از اصول طرح شده از آن وی نبودند. سیکل چهارهنگامی را بو دو روشا طرح کرده و اوتو آن را عملی ساخته بود. تراکم قبلی هوا، به تنهایی و نه مخلوط با سوخت، و پاشیدن سوخت در پایان مسیر را به ترتیب آقایان لاورنس هارگریو، آکروید - استوارت و کاپیتانه مورد استفاده قرار داده بودند. احتراق در فشار ثابت به بریتون برمی‌گشت. حتی اشتعال در اثر گرمای برخاسته از فشار را بو دو روشا در نظر داشت. اوتو کوهلر<sup>۲</sup>، مؤسسه دویتس، ا. کاپیتانه هرکدام جداگانه به امتیاز دیزل که باطل نشده بود نیز چرخه‌ای را شامل می‌شد که هرگز آن را عملی نکرده بود - اعتراض کردند.

به هر حال، اعتراض علیه تقدم رودلف دیزل هرچه بود، وی توانست موتوری بسازد که سلسله‌جنبان اختراعات و تحولات فراوانی است، کاری که هیچ‌یک از پیشگامان وی که در آن زمان معترض وی

۱. Augsburg شهری در غرب با واریای آلمان، مرکز سوایا.





شکل ۸۹. موتور آزمایشی سوم دیزل (۱۸۹۸).

۱. پیستون؛ ۲. مکانیسم خنک‌سازی با آب؛ ۳. سوپاپ ورود؛ ۴. انژکتور سوخت؛ ۵. سوپاپ تخلیه؛ ۶. مکانیسم خنک‌سازی سرسیلندر با آب؛ ۷. سوپاپ اطمینان؛ ۸. رینگ پیستون؛ ۹. مکانیسم روغنکاری؛ ۱۰. شاتون.

شدند بدان دست نیافتند. کار شخصی وی طی دهه پایانی سده نوزدهم تمام شد. در اواخر سال ۱۸۹۳ پیش‌نمونه دیگری طرح شد که در آغاز سال بعد آزمایشهایی روی آن انجام گرفت. این موتور دوم که تغییر شکل یافته بود تا سال ۱۸۹۵ هنوز خدمت می‌کرد. سرانجام دیزل با یاری مانوئل لاوستر<sup>۱</sup> نقشه موتور سوم را تهیه کرد. این موتور که در سال ۱۸۹۷ ساخته شد، نخستین موتوری بود که نتایج قطعی داشت (شکل ۸۹).

هرچند که در این دوران سوختهای گوناگون: گازی، بنزینی، گرد زغال به‌کار گرفته می‌شدند فراورده‌های نفت سنگین به دلایل گوناگون مناسبترین سوخت برای چنین موتورهایی شناخته شد. دشواریهای چندی که در بالا از آنها سخن رفت: شکل و حجم محفظه احتراق، خنک کردن پیستون با جریانی از آب که از شاتون می‌گذشت، وسیله تزریق سوخت با یک تلمبه هوا، مرتفع شدند. مشکل تزریق یکی از مسائل اساسی مراحل آخر تحقیق بود. حل این مشکل با عمل تزریق به

یاری جریانی از هوا با فشار ۴۰ اتمسفر، یعنی کمی بیشتر از فشار داخلی (۳۰ اتمسفر) انجام گرفت. بیش از ۲۰ سال دیگر باید می‌گذشت تا تزریق مکانیکی با فشار زیاد پذیرفته شود.

روش اشتعال برای مدتی لاینحل ماند. دیزل نیز مانند معاصران خود روشهای گوناگونی را آزمایش کرد: اشتعال با لامپ ملتهب، اشتعال با برق؛ اما در پایان، اشتعال با حرارت برخاسته از فشار بود که یکی از خصیصه‌های بنیادین موتور دیزل شد.

موفقیت‌های نخستین: دیزل در برابر خود تنها با مخالفان روبه‌رو نبود؛ مسأله بسیار مهم‌تر از این بود. مؤسسات متعددی به وی مراجعه کردند و از همان سال ۱۸۹۴ اجازه‌های ساخت اختراعاتی وی را خریدند. بعضی از مؤسسات از وی پشتیبانی مالی و فنی کردند. همه کارهای اصلی وی در شهر آوگسبورگ انجام گرفت و تعیین دقیق سهم دیزل و سهم مهندسان مؤسسه MAN در راه‌انداختن و سپس تکمیل این موتور کار بسیار دشواری است.

در مونیخ یک استاد دانشکده فنی با نام مورتیس شروتز از مقام خود برای پشتیبانی از وی استفاده کرد. او در سال ۱۸۹۷ آزمایشهایی انجام داد که نتایج مطلوب آن مورد تردید نبودند. در فرانسه، صنعتگری با نام فردریک دیکوف<sup>۱</sup> از شهر بار-لو-دوک<sup>۲</sup> در فوریه ۱۸۹۷ با موتوری که برپایه طرحهای دیزل در کارگاه خود ساخته بود نتایج دلخواهی به‌دست آورد. در آغاز همین سال، مدل‌های دیگری از این پیش‌نمونه در کارخانه زولتسرواقع در وینترتور، و در کارخانه کروب در اسن و بالاخره در دویتس مورد آزمایش قرار گرفتند. همکاری مؤسسه اخیر برای انجام یک آزمایش نشانه اعتماد به وی بود و برای دیزل اهمیت شایانی داشت.

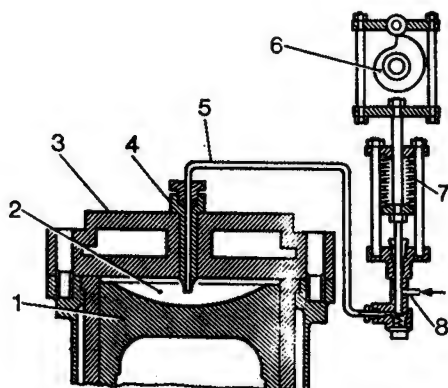
نتایج متفاوتی که به‌دست آمده بودند امیدهای شکوهمندی را نوید می‌دادند. پیش‌نمونه‌ها ایجاد ۱۸/۳ اسب قدرت در ۱۵۸ دور دقیقه با مصرف ۲۳۴ گرم سوخت برای هر اسب در یک ساعت می‌کردند که بازدهی کاملاً استثنایی ۲۶/۶٪ بود.

چندی نگذشت که کارخانجات متعددی در کشورهای گوناگون: انگلستان، سوئد، دانمارک، ممالک متحده آمریکا و غیره اجازه ساخت این موتور را از دیزل خریدند. در سال ۱۸۹۸ برای نخستین بار موتورهای دیزل در نمایشگاه مونیخ به نمایش گذاشته شدند.

مرحله تکمیل: دیزلهای اولیه بازاری، موتورهایی با یک سیلندر عمودی با قدرت ۲۰ تا ۳۰ اسب داشتند. در سال ۱۸۹۷ دیزل یک موتور مرکب دارای سه سیلندر عمودی با ۱۵۰ اسب را آزمایش کرد. اما کاروی دنبال نشد. دو سال بعد، یکی از کارشناسترین آلمانیها به نام هوگو گولدرنر نخستین

1. F. Dyckhoff

۲. Bar-le-Duc شهری در شمال شرقی فرانسه، مرکز ولایت موز



شکل ۹۰. سیستم تزریق مکانیکی با فشار زیاد، ابداعی مک کچنی (۱۹۱۰).

۱. پیستون؛ ۲. محفظه احتراق؛ ۳. سرسیلندر؛ ۴. انژکتور؛ ۵. لوله فشار قوی؛ ۶. مکانیسم فرمان تلمبه تزریق؛ ۷. تلمبه تزریق؛ ۸. لوله فشار کم.

موتور دوهنگامی را، که رواج بسیار گرفت، ساخت.

هرکارخانه اصلاحات مورد نظر خود را روی این موتور عملی کرد. مشکل تزریق باز هم موضوع تحقیقات متعددی بود. روش فشار هوا تا مدتی بی‌رقیب بود. کمپرسور دومرحله‌ای را اولین بار کارخانه آلمانی ری‌دینگر<sup>۱</sup> به‌کار گرفت و سبب شد که هوا در فاصله دو مرحله، خنک و در نتیجه، خطر ترکش بر طرف شود. این کمپرسور فشار هوا را به ۷۰ تا ۸۰ اتمسفر، یعنی دو برابر فشاری که در پایان مرحله فشار در سیلندر وجود داشت بالا می‌برد. این سیستم، کار پاشیدن سوخت را بخوبی عملی می‌ساخت اما تنها مناسب موتورهای با دور کم بود. در سال ۱۹۱۰ آقای جیمز مک کچنی<sup>۲</sup> برای نخستین بار تزریق مکانیکی با فشار زیاد ۱۵۰ تا ۴۰۰ اتمسفر را عملی ساخت (شکل ۹۰)، روشی که طی ده سال عمومیت یافت و سرانجام به‌طور کامل جانشین تزریق با فشار هوا شد. در این روش، کشش سوخت بوسیله جریانی از هوای فشرده، دیگر جایی نداشت و عمل پاشیدن سوخت را تلمبه پیستونداری با فشار زیاد تأمین می‌کرد. بعدها بر همین اساس شمار فراوانی از راه‌حلها پیشنهاد شد که همگی دارای مزایا و معایب مخصوص خود بودند.

این روش تزریق مکانیکی پایه‌ای شد تا در سال ۱۹۳۰ دیزلهای با دور زیاد ساخته شوند و کاربرد آنها به مقیاس زیاد در دهه‌های بعد رواج گرفت. اما این امر به تنهایی برای ایجاد جهشی که

1. Riedinger 2. J. Mckechnie

در این صنعت پدید آمد کافی نبود و لاقط دو مسأله دیگر می‌بایست در همان زمان مورد بررسی قرار گرفته باشند: مسأله محفظه احتراق و مسأله چرخه کار. از زمانی که آکروید - استوارت محفظه احتراقی طرح کرد که با یک روزنه به سیلندر راه دارد، شکل و ترتیب این محفظه تا امروز هم پیوسته مورد بررسی و تحقیق است. کار پاشیدن کامل سوخت در حجم معینی از هوا و اشتعال آمیزه و ادامه احتراق همچنین چند پدیده دیگر می‌بایست با بهترین نظم و بیشترین بازده تأمین شوند و بدین جهت راه‌حلهای پیشنهادی نیز بسیار بودند. محفظه جداگانه تنها مقوله‌ای بود که به انواع متعددی تقسیم می‌شد: محفظه‌های پیش از احتراق، محفظه‌های پر آشوب و محفظه‌های ذخیره هوا، که هر یک از نوعی درک شرایط تحقق و وسایل انجام کار نشأت می‌گرفتند. می‌بایست به یاد آورد که این تعداد تحقیق که پیوسته به راههای گوناگون انجام می‌گرفتند در مسیر یک تئوری کلی نبود و به علت اهمیت بالای مسائلی که باید حل می‌شدند آنها را نمی‌شد با روشهای ریاضی، در کل، حل کرد. در حقیقت نوعی فرآیند تجربی و غالباً اختیاری بر این پژوهشهای مینیاتوری فرمان می‌راند و بنابراین راه‌حلهای، بی‌شمار بودند.

کار در آغاز، همان‌طور که دیدیم، مربوط به احتراق در فشار ثابت می‌شد، اما بزودی به‌سوی نوعی چرخه «مختلط» گرایش یافت که ترکیبی از موتور بنزینی، با احتراق در حجم ثابت و مخصوص دیزل بود که احتراق در آن با فشار ثابت انجام می‌گرفت. حدود سال ۱۹۰۹ بود که آقای ساباته<sup>۱</sup>، مهندس فرانسوی به مزایای مختلط پی‌برد و راه عملی کردن آن را یافت - کاری که با دو مرحله‌ای کردن تزریق سوخت انجام‌پذیر بود: احتراق بخشی از سوخت در حجم ثابت، سپس تزریق بخش دیگر سوخت در سیلندر که با فشار ثابت محترق می‌شود.

باز در همین دوران بود که تزریق با فشار هوا، که تنها راه کار بود، تا توالی این دو مرحله منظم باشد با دشواریهای زیادی مواجه شد. تنها پس از گذشت ۱۵ یا ۲۰ سال یعنی، زمانی که برتری چرخه ساباته کاملاً پذیرفته شد و این، مدل کار موتورهای دیزل با دور زیاد شد، تزریق مکانیکی به‌کار گرفته شد.

از بازده حرارتی ۳۵ تا ۴۰٪ و میانگین فشار مؤثر ۶ تا ۷/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، بدون افزایش فشار هوا، تنها با استفاده از موتورهای توربینی با افزایش فشار یا از موتورهای پیستونداری که با توربو ماشین مزدوج بودند به مرزهای بالاتر دست یافتند.

با وجود سادگی آشکار دیزل، لاقط در تئوری، از همان ساعت‌های نخست، سازندگان این نوع موتور با دشواریهای بسیار پیچیده‌ای روبه‌رو شدند که کار تزریق، محفظه احتراق، چرخه کار، باز در

صف نخست مشکلات بودند. در مراحل مختلف پیشرفت راه حل گوناگونی که به کار گرفته می شدند بافته ای از مزایا و معایبی بودند که غالباً از راه تجربه برطرف می شدند.

کاربردها: از همان سالهای نخستین انتظار می رفت که رواج موتور دیزل باید بسیار سریع باشد. دو کاربرد اصلی این نوع موتور، کار ثابت در کارخانه ها و حرکت دادن کشتیها بود.

نخستین موتور دیزل صنعتی در سال ۱۸۹۸ در کارخانه کبریت سازی کمپتن<sup>۱</sup> واقع در باویر به کار گرفته شد. این اولین دیزل دو سیلندری بود که ۶۰ اسب قدرت و ۱۸۰ دور در دقیقه داشت. این موتور که در MAN ساخته شده بود با نام موتور کمپتن شناخته می شد. چند سال بعد، موتور دیزل ظاهراً ویژه مولدهای برق شد. نیروگاه برق تراموای شهر کیف، نخستین جایی بود که با موتورهای دیزل مجهز شد و در برهه سالهای ۱۹۰۳ - ۱۹۰۶ شش دیزل ۴۰۰ اسبی با ۱۶۰ دور در دقیقه در آنجا کار گذاشته شدند.

در سال ۱۹۰۳ بازم، یک قایق بادبانی مشهور به *Petit-Pierre* با دیزلی دارای پیستونهای متقابل با قدرت ۲۵ اسب و ۳۶۰ دور در دقیقه، ساخت کارخانه سوتر - هارله مجهز شد. در همین دوران و در سالهای پس از آن کشتیهای دیگری در سوئد، روسیه، سوئیس و کشورهای دیگر با موتور دیزل حرکت می کردند. در فرانسه، نیروی دریایی بخصوص برای زیردریایهای خود علاقه مند به موتور دیزل شد. در همان سال ۱۹۰۳ کارخانه سوتر - هارله برای زیردریایی اسرارآمیز Z دیزلی ساخت و در ۱۹۰۴ برای گروه زیردریایهای *pierres précieuses* سفارشی دریافت داشت. سپس در سال ۱۹۰۷ نوبت *Mariotte* با یک دیزل ۷۰۰ اسبی شد. کارخانه مان در همان سال برای زیردریایهای فرانسه موتورهای دیزل تولید کرد و حال آنکه آلمان تا سال ۱۹۱۲ زیردریایی دیزلی نداشت. در همان سال کارخانه دانمارکی بورمایستر - واین<sup>۲</sup> یک دیزل هشت سیلندری با قدرت ۱۰۰۰ اسب و ۱۴۰ دور در دقیقه برای کشتی بزرگ تجارتی *Sealandia* که به آسیا رفت و آمد داشت ساخت و این موتور شهرت بسیار به هم رسانید.

با این حال، از سال ۱۹۰۰ در ساخت موتورهای دیزل رکوردی حاصل شد. گرچه کارخانه های زیادی اجازه و ساخت این موتورها را خریدند، بیشتر آنها قدرت فائق آمدن بر مشکلات راه اندازی چنین موتوری را که هنوز کار آن با پیشامدهای زیادی همراه بود، نداشتند. وانگهی، رواج موتور دیزل با تجهیزات صنعتی و مهم ماشینهای بخار، که به کمال خود دست یافته بودند و نیز با رواج بسیار پیشرس توربینهای بخار همزمان شد. تنها در پرتو پشتکار کارخانه داران بسیار هوشمندمان، زولتسر، سوتر - هارله بود که دیزل توانست طی چند سال این شروع بسیار بد را پشت سرگذارد. کارخانه مان

پس از موفقیت‌هایی که به دست آورد در سال ۱۹۰۸ برای همیشه ساخت ماشینهای بخار را - که بهترین تولید آن بود به کناری گذاشت و یکسره به تولید موتورهای دیزلی روی آورد. وانگهی امتیاز دیزل در همان سال از میان رفت. بدین ترتیب ساخت این موتور با جدیت بیشتری انجام گرفت و تلاشهای فنی برای افزایش ویژگیهای آن چندین برابر شد. قدرت این موتور از ۳۰ اسب در سال ۱۹۰۰ به ۱۰۰۰ اسب در حدود سال ۱۹۱۰ رسید. عصر ساخت دیزلهای غول‌آسایی با دو هنگام برای کارکردن در کشتیها فرارسیده بود.

در سال ۱۹۱۰ اندیشه کاربرد موتور دیزل در راه‌آهن مطرح شد. نخستین لوکوموتیو دیزلی را شرکت کلوزه - زولتسر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۱۲ به راه انداخت. اما دیزل برای این کار، تا پایان سالهای ۳۰ آمادگی نداشت.

جنگ جهانی اول تأثیر خوبی روی گسترش ساخت دیزل داشت، گرچه اثر آن روی موتورهای بنزینی بیشتر بود. بویژه در آلمان تجهیز زیردریایها با دیزل اغواکننده بود. کارخانه‌مان دیزلهایی با ده سیلندر می‌ساخت که چهارهنگامی بودند و ۱۳۰۰۰ اسب قدرت و ۳۹۰ دور در دقیقه داشتند و کارخانه‌کروپ دیزلهایی برای زیردریایی می‌ساخت که شش سیلندر داشتند، دوهنگامی بودند با قدرت ۱۶۵۰ اسب و ۳۵۰ دور در دقیقه.

این نیازها با توسعه نیروی دریایی و کشتیهای باری، پس از پایان گرفتن مخاصمات پدید آمدند و صنعت ساخت موتورهای دیزل رونق جهانی فراوان یافت.

این زمانی که تزریق مکانیکی، راه را برای موتورهای سریع گشوده بود، موتورهایی که همراه با موتورهای کند سنتی میدان کاربرد دیزل را توسعه دادند.

باز باید گفت که این زمانی بود که روش افزایش فشار، که در سال ۱۹۱۱ برادران زولتسر آن را اجرا می‌کردند معمول شده بود. با اینکه در موتورهای احتراقی، این روش به علت خطر ایجاد انفجار، محدود شده بود در دیزل، تنها به بهبود احتراق کمک می‌کرد. بدین دلیل افزایش فشار نخست در موتورهای دیزل با قدرت بسیار زیاد، و سپس در بقیه آنها عمومیت یافت. در سالهای ۳۰ این کار سبب افزایش قدرت موتور دیزل، حداکثر تا ۶۰٪ بود. این افزایش در روزگار ما به ۲۰۰٪ رسیده است. این کار سبب می‌شود که میانگین فشار مؤثر از رقم حداکثر هشت کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در دیزلهای بدون افزایش فشار به حدود رقم ۲۰ کیلوگرم و حتی بیشتر در دیزلهای با افزایش فشار برسد. بازده حرارتی هم تا ۴۵٪ بالا رفته است.

موتورهای دیزل کند، که سرعت گردش آنها حداکثر ۱۲۰۰ دور در دقیقه است برای قدرتهای

بسیار بالا به‌کار گرفته شدند. اگر در دوران جنگ جهانی نخست، قدرت قویترین موتورهای حدود ۳۰۰۰ اسب بود در حدود سال ۱۹۳۰ به ۱۵۰۰۰ اسب و در روزگار ما به ۳۰۰۰۰ اسب (با ۳۰۰۰ اسب برای هر سیلندر) افزایش یافته است. در سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ موتورهای چهار هنگامی دوطرفه (مثلاً: بورمایستر-واین با ۱۰۰۰۰ اسب در ۱۹۲۴) و موتورهای دوهنگامی یکطرفه با روبش طولی (مثلاً: زولتسر ۱۳۰۰۰ اسب در ۱۹۲۴) برای کشتی *Aorangi* ساخته شدند. در دههٔ پس از آن، موتورهای چهارهنگامی دوطرفه به‌علت دشواری ساخت کنار گذاشته شدند و به ساخت موتورهای چهارهنگامی یکطرفه دارای افزایش فشار روی آوردند.

در همان زمان موتورهای دوهنگامی یکطرفه، دوطرفه با پیستونهای متقابل عرصه را تصاحب کردند. پس از جنگ جهانی دوم، موتورهای دیزل بسیار قدرتمند (با دور بسیار کم ۵۰۰ دور در دقیقه) عنوان موتورهای دوهنگامی را در انحصار خود گرفتند. اکنون این موتورها در رقابت تنگاتنگی با توربینهای بخاری و گازی هستند.

با پیشرفت موتورهای با دور زیاد، میدان کاربرد دیزل در آغاز سالهای ۱۹۳۰ شامل هواپیماها، اتومبیلها و راه‌آهن شد. در مورد موتورهای دیزلی هواپیما باید گفت که پیش از جنگ جهانی دوم و در سالهای نخستین مخاصمات مدت نسبتاً کوتاهی رواج داشت. بویژه کارخانهٔ یونکرز به ساخت دیزلهای دوهنگامی با پیستونهای متقابل برای هواپیمای بمب افکن آلمان می‌پرداخت. اما این دیزلها به‌علت برتری موتورهای بنزینی و کمی بعد موتورهای واکنشی در هواپیماها کنار گذاشته شدند.

در رشتهٔ حمل‌ونقل زمینی، وضع به‌گونه‌ای دیگر بود. در سال ۱۹۲۰ آقایان ارنست - فرای<sup>۱</sup> و کارل فیشر، موتور دیزلی را روی موتورسیکلتی سوار کردند. این موتور که هفت اسب قدرت داشت و در هر دقیقه ۲۴۰۰ دور می‌گردید بی‌شبهه نخستین «دوچرخهٔ» دیزلی بود. در همان زمان در فرانسه آقای تارتزه<sup>۲</sup> دیزل سبکی را که سرعت زیاد داشت برای پژویی که در مسابقهٔ اتومبیلرانی پاریس - بوردو شرکت می‌کرد طراحی نمود. در سالهای پس از آن سازگار کردن دیزل با راهپیمایا پیشرفت کرد. نخست وزنهای سنگین، تراکتورها، اتوبوسها، وسایل ساختمانی و ماشینهای جنگی بودند که بتدریج با موتورهای دیزل مجهز شدند. این گرایش در سالهای ۱۹۳۰ قوت گرفت و پس از جنگ جهانی دوم در سالهای ۹۵۰ به حوزهٔ اتومبیلهای شخصی نیز نفوذ کرد.

«دیزلی کردن» راه‌آهن، گسترشی آهسته داشت. یک مشکل اصلی این کار، گزینش طرز ارتباط محور راه‌انداز یا اصلی به محوره‌های کشنده به تناسب قدرت دیزل، یعنی به تناسب نوع لکوموتیو و نیز سرویس مورد نظر آن بود. ارتباط مکانیکی مناسب قدرتهای کم بود و در این زمینه

مزایای سبکتر و نیز ارزاتر بودن از سیستمهای دیگر مدنظر بودند. این روش می‌بایست برای اتوریلها تطبیق داده می‌شد. ارتباط هیدرولیکی خود را مناسب قدرتهای متوسط نشان داد و بری تجهیز تراکتورهای سرویس مفید بود. اما تنها ارتباط الکتریکی، مناسب لوکوموتیوهایی است که برای کشیدن واگنهای مسافری یا کالا به‌کار گرفته می‌شوند. این نوع ارتباط علاوه بر دیگر مزایا دارای فرمان بسیار راحت‌تری برای تغییر قدرت و سرعت است. موتور دیزل با این نوع ارتباط مولدی به‌همراه دارد که موتورهای برقی روی محور کشنده را تغذیه می‌کند.

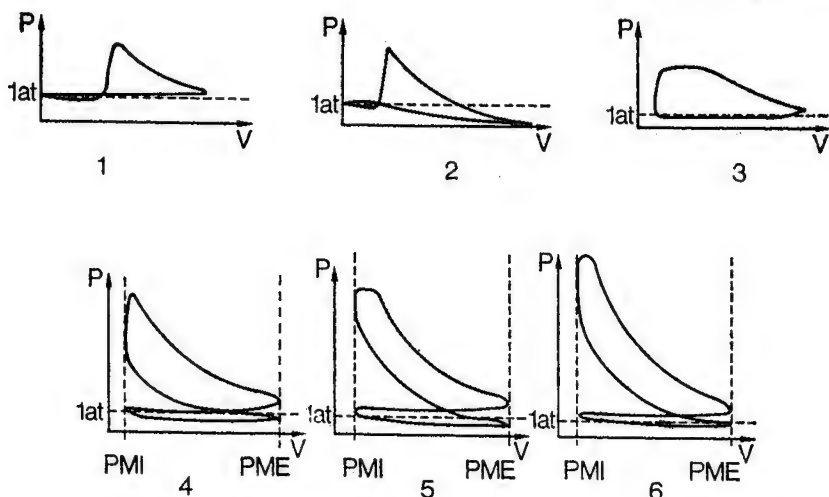
نخستین لوکوموتیو دیزلی برقی در سال ۱۹۲۸ در انگلستان ساخته شده، پس از آن در ۱۹۳۲ در آلمان و در ۱۹۳۴ در ممالک متحده امریکا. در همین مملکت بود که دیزلی کردن در آغاز سالهای ۱۹۴۰ به‌طور سیستماتیک دنبال شد. حذف لوکوموتیو بخاری از اوایل سالهای ۱۹۶۰ سرعت گرفت. در اروپا، در کشورهایی که پارکهای لوکوموتیوهای پارک‌شده در جریان جنگ جهانی دوم متحمل تلفات سنگین شدند موتورهای دیزل در شبکه‌هایی که برای برقی شدن ساخته نشده بودند بسرعت جای لوکوموتیوهای بخاری را گرفتند.

در پایان مقاله مربوط به موتورهای درونسوز بیستوندار، می‌توان پیشرفت اعجاب‌انگیزی را که این وسیله تولید انرژی طی یک سده داشته است با نگاه به نمودارهای مربوط به چرخه‌های موتورهای گوناگون و با به یاد آوردن مقادیر بازده حرارتی مرور کرد. بازده موتور لنوار سال ۱۸۶۰ فقط ۴/۶٪ بود، اما امروز به بازده ۲۵٪ برای موتورهای احتراقی خودروها و ۲۹٪ برای همین موتورهای درحالی‌که با توربینهای گازی انفجاری مزدوج شده‌اند رسیده‌ایم و بازده ۴۰٪ را برای موتورهای دیزل فاقد افزایش فشار و ۴۵٪ را برای موتورهای دیزل با افزایش فشار داریم (شکل ۹۱).

### توربینهای گازی و موتورهای واکنشی

از جمله چیزهایی که در اواخر سده نوزدهم در رشته کاربرد بخار آب به‌عنوان شاره حرکت‌دهنده در موتور دارای روتور به‌دست آمد، اصل احتراق درون ظرفی سر بسته و انبساط گازهای سوخته شده بود که در نیمه نخست سده بیستم در توربینها مورد استفاده قرار گرفت. جریان تکاملی اندیشه‌ای که بدین اختراع انجامید بخوبی قابل درک است و ادامه آن به اختراع توربینهای بخار کشیده شد. این توربینها با به‌کار گرفتن روتورهای پره‌دار در توربینهای آبی و تعویض یک کار فنی انبساط بخار، که از مدتها پیش در ماشینهای پیستونی از آن استفاده می‌شد با کار فنی دیگری که آن نیز کلاسیک شده بود؛ یعنی ضربه جریان آب روی پرگان، ساخته شدند. توربین گازی نیز نتیجه انتقال یک کار





شکل ۹۱. نمایه‌های چرخه‌های گوناگون موتورهای پیستونی.

PMI: نقطه مرگ داخلی؛ PME: نقطه مرگ خارجی.

۱. چرخه موتور دوهنگامی دوطرفه و بدون تراکم اولیه (لنوار، ۱۸۶۰)؛ ۲. چرخه موتور اتمسفری (اوتو- لانگن، ۱۸۶۷)؛ ۳. چرخه موزر دوهنگامی با تراکم قبلی در بیرون سیلندر، احتراق در فشار ثابت (چرخه بریتون)؛ ۴. چرخه چهارهنگامی با انفجار (چرخه اوتو- بو دو روشا، احتراق در حجم ثابت)؛ ۵. چرخه موتور دیزل (چرخه دیزل با احتراق در فشار ثابت)؛ ۶. چرخه موتور سریع دیزل (چرخه ساباته با احتراق مختلط)

فنی، از موتورهای بنزینی یا دیزلی به شرایط کاری دیگر، نه روی جبهه پیستون بلکه روی نیمرخهای پره‌های موجود در یک محورگردان بود.

تنها می‌توان گفت که اختراع توربینهای گازی در اصل از توربینهای بخار الهام گرفته شده است زیرا آن‌طور که خواهیم دید نخستین طرحهای مربوط بدان همزمان با طرحهای مربوط به توربینهای بخار بوده‌اند. با این حال تردیدی نیست که موفقیت‌های سریع توربینهای بخار بود که بمحض اینکه کاربرد احتراق درونی در موتورهای پیستونی به‌طور کامل حاصل شد، یعنی طی سالیان نخستین سده بیستم، راه را برای پیشرفت توربینهای گازی گشود.

با این همه، اختراع و پیشرفت توربین گازی با جریان پیشرفت همدیاف بخاری خود تفاوت‌های جدی دارد. مراحل نوآوری آن بسیار طولانی‌تر بوده است زیرا موتورهای اولیه قابل استفاده تا اواخر سالهای ۱۹۳۰ در دسترس نبودند. وانگهی برای اینکه کاربرد توربینهای گازی پیامدهای فنی قطعی داشته باشد دو یا سه دهه گذشت زمان لازم بود و این پیامدها جز در یک زمینه، در

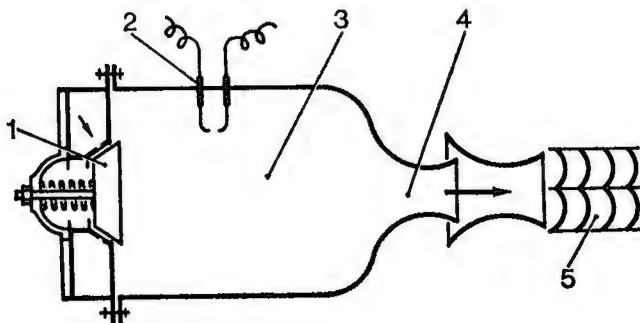
هواپیماهای جنگی و هواپیماهای حمل و نقل، به طور جهشی پدید نیامدند. در این هواپیماها، همین که توربو راکتورها رواج یافتند موتورهای پیستونی کنار گذاشته شدند.

سرانجام، توربینهای گازی لااقل در مراحل پایانی پیشرفت، در کانون یک جنبش پژوهشی برای استفاده هرچه بیشتر از اصل احتراق درونی هستند. این امر نخست در کاربرد گازهای فراری از توربین برای فعال کردن کمپرسورهای مخصوص افزایش فشار موتورهای پیستونی تحقق یافت و بدین ترتیب چرخه‌های دتانت مدید میسر گردید. بعدها این کوششها برای سازگار کردن نوع خاصی دیزل، موتور پیستون آزاد، با کارگازسازها برای توربین دنبال شد و پس از مدت زمانی طولانی، از یکسو برای ساختن توربو پروپولسورها و توربو راکتورهای مخصوص هواپیما، و از سوی دیگر در نهایت برای حذف توربین در نوع خاصی از راکتور، راکتورهای استاتیک و پولسوراکتورها که در آنها تراکم لازم هوا برای احتراق بر اثر سرعت زیاد جابه‌جایی موتورها در هوا حاصل می‌شود، ادامه یافت.

مراحل اولیه توربینهای گازی: رسم شده است که ثبت اختراع آقای جان باربر در سال ۱۷۹۱ را نخستین پیدایی اندیشه‌های مربوط به توربینها به‌شمار آورند. در این سند درباره هدایت گازها از یک محفظه سوخت به‌سوی یک چرخ پره‌دار سخن رفته است. اما طبیعی است که این طرح عملی نشد. طرح آقای بوردن، که در سال ۱۸۲۴ مبتکر توربینهای آبی بود بسیار روشنتر است. وی در سال ۱۸۴۷ ساخت یک «توربین با باد گرم و دارای چندین روتور را، که از یک ردیف دمه‌ای مرتبط با یکدیگر به‌عنوان کمپرسور استفاده می‌کرد» پیشنهاد نمود.

سرانجام نخستین امتیازی که واقعاً در رابطه با توربینهای گازی به ثبت رسید از آن لاوال سوئدی در سال ۱۸۹۳ بود. وی طرز کار توربین بخاری کنشی را، به توربینی از همان نوع که با گازهای سوخته شده در یک محفظه احتراق کار می‌کرد انتقال داد. همان‌طور که در گذشته دیده شد، دهانه دتانت، گازها را به طرف پرگان توربین هدایت می‌کرد. اما در این نوشته از کمپرسور هوا و تزریق سوخت مایع چیزی دیده نمی‌شود.

در سال ۱۸۹۹ اشتولتسه<sup>۱</sup> آلمانی طرح روشنتری داد. توربین با گازهای سوختی، براساس شرح وی شامل یک کمپرسور مرکزگیز است که مستقیماً روی خود محور توربین نصب شده است. یک نمونه آزمایشی از آن در سال ۱۹۰۴ ساخته شد اما دنباله آن را نگرفتند. باید گفت که پیشرفت توربینهای گازی در حدود نیمه سده بیستم برپایه طرح اشتولتسه بوده است.



شکل ۹۲. توربین گازی «انفجاری» آرمنگو (۱۹۰۳).

۱. سوپاپ ورود مخلوط سوخت؛ ۲. مکانیسم اشتعال برقی؛ ۳. محفظه احتراق؛ ۴. دهانه خروج گاز؛ ۵. توربین.

محفظه احتراق «انفجاری»: در همان زمان طرح دیگری برای ساختن توربینهای گازی اقبال زیادی یافت. در سیستمی که در بالا ذکر آن رفت گازها از سوختی که به طور پیوسته، با فشار ثابت در محفظه‌ای که با کمپرسورها تغذیه می‌شد انجام می‌گرفت تأمین می‌شدند. طرح دیگری هم بود که بیشتر از روش احتراقی استفاده می‌کرد که در موتورهای به اصطلاح انفجاری عملی می‌شد. محفظه احتراق دارای یک سوپاپ ورود سوخت بود و یک شمع الکتریکی متناوباً آن را مشتعل می‌ساخت. کاری که در موتورهای پیستونی انجام می‌گیرد. عمل احتراق در حجم ثابت و فشار فوق‌العاده زیاد است؛ گازهای سوخته شده به جای اینکه در مرحله دتانت روی جبهه پیستون فشار آورند، از دهانه شیپوره به سوی پره‌های توربین پرتاب می‌شوند.

نخستین نوشته‌ها در این مورد، تاریخ ۱۸۹۰ را دارند و تعداد آنها در شروع سده بیستم بسیار زیاد شد. همه اختراعات ثبت شده تغذیه محفظه سوخت را از راه مکش و در فشار جو. درست مانند نخستین موتورهای گازی بدون تراکم قبلی - توصیه می‌کنند. آقای آرمنگو، مهندس فرانسوی، نخستین توربین از این نوع را در سال ۱۹۰۳ در کنگره مکانیسین‌ها در لیژ نمایش داد (شکل ۹۲). هرچند که نمونه‌های دیگری از این دست ساخته شدند. اما بزودی از رواج، افتادند. بازده آنها بسیار پایین بود و پس از مدت زمان کمی، بدین نتیجه رسیدند که قبل از ورود مخلوط سوختی در محفظه، آن را تحت فشار قرار دهند. آقای ه. هولتس‌وارت<sup>۱</sup>، مهندس آلمانی، که در سال ۱۹۰۸

1. Holzwarth H.

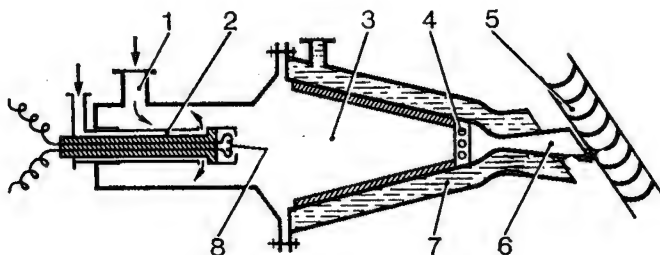
مطالعه مسأله توربینهای گازی را شروع کرد، نخستین کسی بود که از همان سال ۱۹۰۹ این نوع تغذیه را مطرح ساخته است. وی از کمپرسورهای توربینی، که در آن زمان برای تزریق پنوماتیکی در دیزلها زیاد به کار می‌رفتند استفاده کرد. برای اینکه اثر ناپیوسته بودن اشتعال متناوب را کم کند آقای هولتس‌وارت در سال ۱۹۱۰ تعداد محفظه‌های احتراق یک توربین را تا ده عدد بالا برد، بدین طریق اشتعال در فواصل زمانی کوتاهی از یک محفظه به دیگری منتقل می‌شد.

در طی سالهای پس از آن هولتس‌وارت رفته‌رفته جزئیات بسیاری از توربینهای خود را که آقای تیسن<sup>۱</sup> در مولهایم<sup>۲</sup> می‌ساخت تا سال ۱۹۳۴ تکمیل کرد: «جانشین کردن توربین بخار با یک موتور برقی برای فعال کردن کمپرسور، کاربرد دوباره جریان خنک‌کننده آب برای اطاق احتراق این توربین، افزایش میزان فشار تا ۳/۵ اتمسفر، سنبه ماتریسکاری پره‌ها از فولاد بسیار نرم. در همین زمان توربینهای دیگری هم ساخته شدند که یکی از آنها از براون - باوری ساخت سال ۱۹۲۸ بود که کمپرسوری هوای با فشار زیاد را وارد کوره دیگ بخار می‌کرد؛ و گازهای مربوط به احتراق این کوره، توربین را می‌گردانیدند.

سرانجام این نوع توربین که معایب فراوان داشت در اواخر سالهای ۴۰ کنار گذاشته شد، محفظه‌های احتراق پیوسته: در زمان حاضر همان طرح اولیه محفظه‌های احتراق پیوسته با مخلوطی از سوخت که با فشار وارد شود مورد توجه قرار گرفته است.

هنگامی که آقای اشتولتسه کارهای اولیه را در این زمینه انجام می‌داد، شرکت فرانسوی توربو موتورسازی برادران آرمنگو و شارل لومال<sup>۳</sup> برای راه انداختن چنین توربینی می‌کوشند (شکل ۹۳). ساخت این توربین بسیار دشوار بود زیرا با آنکه در سال ۱۹۰۱، زمان ثبت اختراع لومال، ساخت آن آغاز شد حدود سی سال، تقریباً به کناری گذاشته شد. اصول ساخت این دستگاهها عیبی نداشتند: کمپرسور مرکزگیز چند مرحله‌ای، محفظه احتراق که بخشی از آن با مواد نسوز ساخته می‌شد و بقیه از ورقهای فولاد که با آب خنک می‌شدند، داخل محفظه را بخار آب خنک می‌کرد و این عمل اثر دثانت مخلوط گازها را افزایش می‌داد، توربین کنشی (ضربه‌ای) یا دارای مراحل سرعت (رجوع کنید به شکل ۹۴). اما وسایل ساخت، ناقص و بازده تقریباً صفر بود و قدرتی که به دست می‌آمد به دشواری بیش از مقداری بود که کمپرسور دریافت کرده بود.

در اواخر سالهای ۳۰ وسایل فنی موجود در حدی بود که با آنها آغاز برطرف کردن دشواریها  
 ۱. Thyssen (۱۸۷۵ - ۱۹۵۱) صنعتگر آلمانی که کارخانه بزرگ آهن و فولاد به ارث به وی رسید. برای روی کار آمدن نازیسم و هیتلر، سخاوتمندانه کمکهایی مالی کرد و در اوایل رژیم نازیها، فرمانروای اقتصاد آنها شد.  
 ۲. Mulheim شهری در آلمان غربی، در وستفالی شمالی



شکل ۹۳. توربین گازی «احتراقی» آرمنگو- لومال (۱۹۰۱).

۱. ورود هوای فشرده؛ ۲. تزریق سوخت؛ ۳. محفظه احتراق؛ ۴. سوراخهای ورود آب در محفظه احتراق؛
۲. توربین؛ ۶. شیپوره پرتاب؛ ۷. جریان آب خنک‌کننده؛ ۸. مکانیزم اشتعال با برق

ممکن می‌نمود. کار توربینها، پیشرفت دانش مکانیک سیالات را در این زمینه امکان‌پذیر می‌ساخت. وانگهی، رشته متالورژی هم مواد خام مقاوم در برابر دماهای بسیار بالای گازها را که برای به‌دست آوردن بازده مطلوب لازم بود، تأمین کرده بود. سرانجام باید گفت که در آغاز جنگ جهانی دوم، تحقیقات برای تکمیل توربوآکتورهای هواپیمایی بسیار پیشرفته بود.

بدین‌ترتیب طی لااقل ۲۰ سال، توربینهای گازی با احتراق پیوسته، به‌طور جدی در صنعت به‌کار گرفته شدند.

کمپرسورهای مرکزگرن، به‌طور کلی پس از سال ۱۹۵۰ به سود کمپرسورهای محوری که بازده و فشار هوای بیشتر داشتند از رده خارج شدند. پره‌های کمپرسورهای محوری، هوا را در جهت موازی با محور موتور می‌رانند، و این تقلیدی از جریان آب در توربینهای کاپلان بود. با این‌همه، کمپرسورهای مرکز گریز که ارزانتر بودند بکلی حذف نشدند. از پیشرفتهای بزرگی که در بخش محفظه احتراق و آماده‌سازی سوختها انجام گرفت می‌توان از کاربرد نفت چراغ یا کروزن نام برد که بدین‌ترتیب، نشست خاکستر سوخت روی پره‌ها از میان رفت.

نوع توربینهای واکنشی، که بازده آنها بیشتر از نوع کنشی است، بالاخره در همان دوره پذیرفته شد و بویژه ساختن آنها با مواد مخصوص همراه با مکانیسم تکمیل‌شده خنک‌سازی افزایش دمای گازها را هنگام ورود به توربین هواپیما، مثلاً از ۷۰۰ درجه در حدود سال ۱۹۴۵ به ۱۲۰۰ درجه در سال ۱۹۶۵ ممکن ساخت. موادی که برای نیل به چنین پیشرفتی در اختیار داشتند عبارت بودند از: فولادهای فریتی و اوستنیتی. مثلاً آلیاژ ۸۰ mimonic دارای ۷۵٪ نیکل، ۲۰٪ کروم

و تنها ۵٪ آهن بود. مواد سرامیکی هم برای پوشاندن قطعات فلزی یک لایه حفاظتی و هم برای ساخت پره‌ها از سرامیک، بهتر شدند.

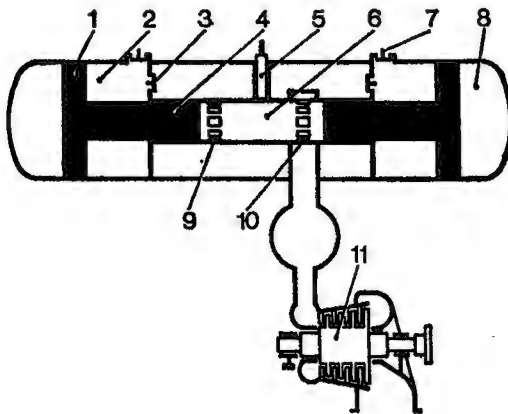
خنک‌سازی با هوای فشرده یا آب، بهتر شدن بازده با استفاده از رکوپراتورهای گرما، تحقیق و محاسبه ریاضی چرخه کار را نیز می‌توان از عوامل اصلی این پیشرفت دانست. نتایج به دست آمده مثلاً از برکت کاراندازی چرخه‌های گوناگون مورد استفاده را ارقام زیر مربوط به ۱۹۶۵ بخوبی نشان می‌دهند: بازده با یک چرخه ساده به ۱۸٪ رسید و با چرخه‌های دارای رکوپراسیون (بازیابی گرما) به ۲۸٪ و بازده با چرخه دارای خنک‌سازی، گرم‌سازی میانی و بازیابی گرما به ۴۰٪ رسید. بدین ترتیب، می‌توان فهمید که دشواریهای متعددی که تکنسین‌ها برای تکامل شصت ساله زندگی این نوع موتور درونسوز جدید باید برطرف می‌کردند از چه قماش بودند.

مولد با پیستونهای آزاد: پیش از آنکه به کاربرد توربینهای گازی بپردازیم باید بی‌درنگ از داستان جالبی از پژوهش فنی در این زمینه یاد کنیم، داستانی که پیشرفت موتورهای پیستوندار و موتورهای توربینی را به یکدیگر مرتبط می‌سازد.

آقای هوگو یونکرس از همان دهه نخست سده ما، نوعی کمپرسور هوا را که مجهز به یک موتور دیزلی دوهنگامی افقی بود مورد آزمایش قرار داده است. سیلندر این موتور، دو پیستون داشت که انبساط گازهای سوختی، آنها را به دو انتهای متقابل می‌راند. دسته یکی از این پیستونها در انتهای خود حامل پیستون بزرگتری بود که داخل یک سیلندر کمپرسور عمل می‌کرد. بدین ترتیب، پیستونهای متقابل این سیلندر، هر کدام به یک پیستون کمپرسور، که در آن زمان برای تغذیه یک توربین گازی نبود، فرمان می‌دادند.

کمپرسورهای با پیستونهای آزاد، تنها پس از گذشت سالیان زیاد به‌طور رضایتبخشی ساخته شدند. در جریان اقداماتی که برای ساخت هلیکوپتر انجام گرفت آقای راؤل دو پاتروس پسکارا<sup>۱</sup>، مهندس آرژانتینی تبار در فرانسه از این نوع کمپرسورها برای گردانیدن پره‌های هلیکوپتر از طریق واکنش هوای فشرده در انتهای پره‌ها استفاده کرد. کمپرسورهای با پیستونهای آزاد ساخت کارخانه یونکرس در زیردریایهای آلمان در جریان جنگ جهانی دوم بخوبی کار کردند.

پسکارا پس از آزمایشهای بی‌نتیجه در سال ۱۹۳۷ برای استفاده از کمپرسور به‌عنوان وسیله گازساز جهت توربین، پس از پایان جنگ این آزمایشها را برای یک مؤسسه فرانسوی از سر گرفت. در نخستین وسیله به‌عنوان کمپرسور، گازهای سوخته شده سیلندر دیزل، ناپدید شدند. اما در دومین وسیله به‌عنوان مولد، گازهای سوخته شده از نو، به شکل مخلوط با هوای فشرده برای گردانیدن یک



شکل ۹۴. توربینی که یک گازساز دارای پیستونهای آزاد آن را تغذیه می‌کند.

۱. پیستون کمپرسور؛ ۲. استوانه کمپرسور؛ ۳. سوپاپ پسرزی هوا؛ ۴. پیستون حرکت؛ ۵. سوختپاش؛ ۶. سیلندر حرکت؛ ۷. سوپاپهای مکش هوا؛ ۸. بالش هوایی؛ ۹. روزنه‌های روبش؛ روزنه‌های تخلیه؛ ۱۱. توربین گازی.

توربین سودمند افتادند (شکل ۹۴). این سیستم در سالهای ۵۰ کاربردهایی یافت: در لوکوموتیوها، حرکت دادن کشتیها، نیروگاههای حرارتی، اما محدود باقی ماندند.

موتورهای هواپیما: عملاً هواپیماهای جنگی بودند که پیشرفت توربینهای گازی را موجب شدند. بزودی دریافتند که فشار گازهایی که از محفظه احتراق خارج می‌شوند می‌تواند چنان زیاد باشد که وسیله‌ای را که مجهز بدان است در هوا به پیش براند. از همان ابتدای کار، طرحهای گوناگونی پیشنهاد شدند و این واقعیت می‌رساند که مسأله یک رشته نوآوریهای دیگر در کار نیست بلکه پیگیری راههای گوناگون ساخت برپایه یک اصل کلی است. درک کلی این بود که احتراق یک سوخت مایع باید با ایجاد یک فشار بر مخلوط سوختی، پیش از ورود آن در محفظه احتراق بنحوی تأمین شود که سوخت با فشار زیاد به پیش پرتاب شود.

این هردو وسیله که برای ساختن کمپرسور تقریباً در یک زمان پیشنهاد شدند. نوعی کاربرد توربوکمپرسور و بهره‌گیری از فشار هوای جو به دهانه موتوری بود که با سرعت زیاد می‌گردید. هرچند که بررسی این دو روش شانه‌به‌شانه پیش می‌رفت بخوبی نمایان است که روش دوم قبل از اولی به شکل استاتورآکتور و پولسورآکتور مورد نظر بوده است. اما کاربرد آن دیر زمانی نپایید.

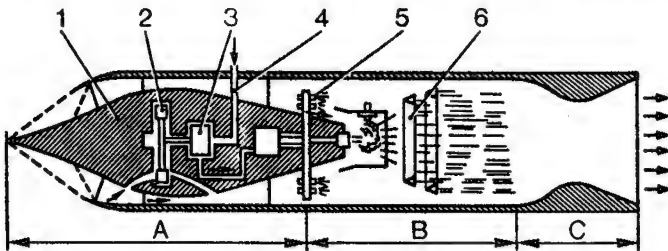
توربورآکتورها طی سالهای ۱۹۲۵-۱۹۴۴ با دشواری زیادی تکامل یافتند اما پیشرفت آنها در سالهای بعد، از نظر تغییر دادن کامل تکنیکهای ساخت هوانوردی شهری و نظامی معجزه آسا بود. باید به یاد آورد که این روش استفاده از توربین گازی جهت پرواز هواپیما، روشی بسیار ساده بود و تنها مستلزم پیوست ملخ هواپیما، به توسط دندهٔ تقلیل دهندهٔ سرعت، به محور توربین بود و این کار، فقط پس از اختراع توربورآکتورها جامعهٔ عمل پوشید.

این تأخیر را تنها می‌توان یک ناپه‌نجاری آشکار در ایجاد فرصتی برای انتقال از یک روش حرکت دادن به روش دیگر، دانست: روش ملخی با موتورهای پیستوندار به روش موتورهای واکنشی. کاربردهای اولیهٔ توربورآکتورها، همان‌گونه که خواهیم دید، تنها در هواپیماهای ارتشی بود این رآکتورها بسیار گران ساخته می‌شدند و تنها بتدریج توانستند آن را برای هواپیماهای سنگین حمل‌ونقل سازگار کنند. اما به‌طوری‌که دیده شد، نوآوری آنها، تکامل توربین گازی را به دنبال داشت. این نوع توربین که در دسترس قرار گرفته بود در آغاز در هواپیما به شکل موتورهای توربینی ملخدار به کار گرفته شدند و در آن زمان استفاده از نفت چراغ ارزان در برابر بنزین و با عدد بالای اوکتان موتورهای پیستوندار هواپیما را ممکن ساختند. باین‌حال، ملخ هواپیما که توربین آن را تقویت می‌کرد نمی‌توانست از سرعت ساعتی ۸۰۰ تا ۹۰۰ کیلومتر برای هواپیما بگذرد. بدین علت بود که زمانی که دشواریهای توربورآکتورها برطرف شدند آنها به جای توربو پروپولسورها، که تنها به‌طور کلی در سالهای ۵۰ به کار گرفته شده بودند، مورد استفاده قرار گرفتند. توربورآکتور به علت داشتن وزن کم با وجود مصرف سوخت زیاد، به عنوان موتور هلیکوپتر توفیق فراوانی یافت.

استاتورآکتورها و پولسورآکتورها: این موتورها بدون قسمت گردنده بودند و تقدم آنها نسبت به توربورآکتورها محل تردید است. عادت شده است که تاریخچهٔ کوتاهی برای آنها داشته باشند زیرا آنها تنها در قسمت موتورهای تکنیکی با تحولات محدود، لااقل تا دوران ما، خودی نشان داده‌اند. اصول کار استاتورآکتور به سال ۱۹۱۳ موضوع اختراع یک فرانسوی با نام لورن<sup>۱</sup> بوده است- اختراعی که هرگز ساخته نشد. فرانسوی دیگری، مهندس لودوک<sup>۲</sup> که در سال ۱۹۲۶ بررسیهای نظری و عملی خود را آغاز کرده بود ده سال بعد نخستین استاتورآکتور را ساخت. با این همه تنها در سال ۱۹۴۹ بود که یک هواپیما با موتور *Leduc 010* نخستین پرواز خود را انجام داد.

استاتورآکتور ساده‌ترین موتور واکنشی است. این موتور شیپوره‌ای به شکل گلولی کربوراتور دارد که در آن هوا در اثر سرعت موتور متراکم می‌شود؛ محفظه‌ای دارد که سوختی که در آن پاشیده





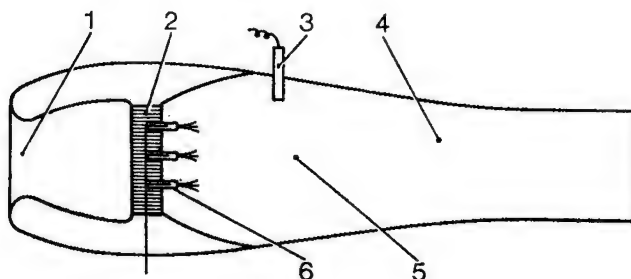
شکل ۹۵. استاتور آکتور.

A: گلوبی؛ B: محفظه احتراق؛ C: شیپوره پرتاب.

۱. بدنه گلوبی قابل تنظیم؛ ۲. توربین هوایی؛ ۳. تلمبه سوخت‌رسان؛ ۴. مکانیسم تغذیه؛ ۵. سوختپاشها؛ ۶. صفحات تثبیت‌کننده شعله.

می‌شود در تماس با هوای فشرده پیوسته در آن محترق می‌گردد و بالاخره یک شیپوره واکنشی گازهای سوخته شده. آقای لودوک با پیگیری خود در سال ۱۹۵۶ توانست هواپیمای *Leduc 022* را با وسایل خاص خود با وارد کردن یک توربوآکتور در داخل این استاتورآکتور به پرواز آورد. از آن پس، این استاتورآکتور (شکل ۹۵) به مناسبت شماری دشواریهای تکنیکی تنها به‌عنوان موتور موشک به‌کار گرفته می‌شد. در این زمینه نیز برای برخاستن موشک از زمین غالباً آن را با موتوری مجهز می‌ساختند. تکامل استاتورآکتور با تعدادی تضاد کاری آن برخورد کرد. این موتور که وسایلی را با سرعت‌های بیشتر از یک ماخ (سرعت صوت) پیش می‌راند برای پرهیز از گرم شدن در اثر اصطکاک با هوا، آن را در لایه‌های بالای جو پرواز می‌دادند، اما در چنین شرایطی، چگالی هوا برای تغذیه آن کافی نبود.

اصول کار پولسورآکتور در آلمان بوسیله پل اشمیت در آغاز جنگ جهانی دوم مورد بررسی قرار گرفت. این کار شامل نوعی اصلاح استاتورآکتور بود به‌طوری‌که بتواند با وسایل خاص خود حرکت را آغاز کند. راه‌حل کار، تغییر دادن شکل چرخه کار با متواتر کردن آن بود و برای این کار ورود هوا به درون محفظه احتراق را به‌کمک سوپاپهایی چند بخش کردند. زمانی‌که فشار در محفظه، پس از احتراق و نیز بیرون راندن گازهای سوخته شده از راه شیپوره واکنش، پایین می‌آمد سوپاپها باز می‌شدند. ورود هوا و تزریق سوخت همزمان و به‌شکل خودکار برحسب شدت احتراق و مقدار فشار در محفظه انجام می‌گرفتند. برای آغاز، مخزنی از هوای فشرده، تغذیه را تأمین می‌کرد. بر این اساس *Argus Motor Gesellschaft* موتور پولسورآکتور اشمیت را که بمبهای پرنده آلمانی



شکل ۹۶. پولسورآکتور.

۱. گلوبی ورود؛ ۲. سوپایهای ورود (شبکه با ۲۵۲ دریچه)؛ ۳. شمع اشتعال؛ ۴. شیپوره پرتاب؛ ۵. محفظه احتراق؛ ۶. سوختپاشها.

معروف به V1 را حمل می‌کرد (شکل ۹۶)، ساخت. اولین V1 که بوسیله فیشر فلوگتسوک باوا<sup>۱</sup> (فیشر هواپیما ساز) ساخته شد در دسامبر ۱۹۴۱ به طور آزمایشی در پیمونده<sup>۲</sup> پرتاب شد. نخستین پرتاب V1 به لندن در ژوئن ۱۹۴۴ بود و سه ماه پس از آن بمب پرنده V2 با موتور موشکی جای آن را گرفت.

پس از پایان جنگ، در فرانسه SNECMA<sup>۳</sup> (شرکت ملی بررسی و ساخت موتورهای هواپیما) تحقیق بر روی پولسورآکتورها و همزمان با آن استاتورآکتورها را از نو آغاز کرد. با وجود چند اصلاحی که انجام گرفت همان دشواریها در کاربرد، بی‌درنگ آشکار شدند. استاتور و پولسورآکتورها که در انتهای پره قرار داده شدند همچون موتورهای هلیکوپتر عمل کردند.

توربورآکتورها: زمانی که داستانهای مربوط به رآکتورهای استاتیک دهان به دهان نقل می‌شد، موتورهای توربینی با سختی زیاد ساخته می‌شدند. در واقع دشواریهایی که حدود ۲۰ سال، این کار را به تأخیر کشانید همانهایی بودند که در همین دوران پیشگامان توربینهای گازی با آنها دست و پنجه نرم می‌کردند. همان‌گونه که گفته شده است، این هر دو نوآوری چه از لحاظ تئوری و چه از نظر ساخت مشکلات واحدی داشتند که باید برطرف می‌شدند.

در سال ۱۹۱۰ آقای رومن هانزی کوآندا<sup>۴</sup> در فرانسه نخستین هواپیمای واکنشی را ساخت اما

1. F. Flugzeugbau

۲. Peenemünde: دهستانی در جزیره‌ای کوچک در دهانه رودخانه پینه در مشرق آلمان، که در جنگ جهانی دوم، مرکز تحقیقات برای ساخت موشک بود.

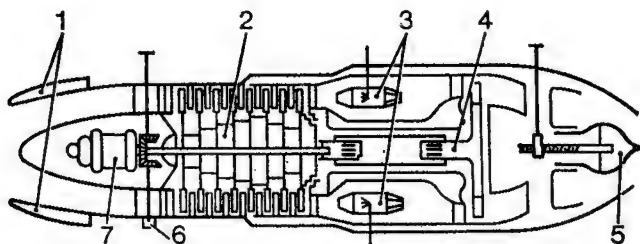
3. Société Nationale d'Étude et de la Construction de Moteurs d'Avion 4. R. Henri Coanda

موتور آن، توربین گازی نبود. باین حال، تردیدی نیست که آقای فرانک ویتل<sup>۱</sup> در طرح توربو راکتورها تقدم داشته است زیرا او بود که اندیشه پرواز دادن هواپیما را با نیروی واکنشی در سال ۱۹۲۰ پیش کشید و در سال ۱۹۲۸ با جدیت برای ساخت آن کوشید. در این کار یک توربین گازی کمپرسور مرکزگریزی را راه می اندازد تا محفظه احتراق را تغذیه کند؛ دتانت گازهای سوخته شده، نخست در توربین انجام می گرفت اما بعدها در شیپوره پرتاب، تا پرواز را میسر سازد. ویتل در آغاز زیاد تشویق نشد و تنها با کمکهای مالی ناچیزی که به وی می شد توانست تحقیقات خود را دنبال کند. نخستین توربو راکتور وی در سال ۱۹۳۷ مورد آزمایش قرار گرفت. دو سال بعد، به عللی که فهم آنها آسان است، سیاستمداران و ارتشیان بریتانیایی به کارهای وی بسیار علاقه مند شدند و در ماه مه ۱۹۴۱ هواپیمایی که با توربو راکتور *Whittle-W1* پرواز کرده بود نیرویی برابر ۳۷۴ کیلوگرم رانشی داشت. هواپیمایی ارتشی بریتانیا توانست تعدادی هواپیماهای جت را در آغاز سال ۱۹۴۴، دقیقاً در زمان لازم برای شکار کردن V1 های آلمان به کارگیرد. موتور این هواپیماها را رولز- رویس، به طور ردیفی می ساخت.

در آلمان، تنها در آغاز سال ۱۹۴۵ بود که در این کار توفیق یافتند، گرچه مقامات دولتی به کارهای هانس فون اوهاین<sup>۲</sup> مبتکر این رشته در آن کشور از همان آغاز علاقه زیاد نشان دادند. آقای اوهاین در سال ۱۹۳۴، زمانی که دانشجوی بود، درباره راکتوری با کمپرسور مرکزگرین، اختراعی را به ثبت رسانید. تکسین های دیگری در سالهای بعد برای شکستن محدودیتهای موتور ملخی در سرعت هواپیما در ساختن توربینهای گازی و حرکت دادن هواپیما با نیروی واکنشی، کوشیدند. در ماه اوت ۱۹۳۹، در آستانه آغاز جنگ، نخستین هواپیمای جت جهان به کمک توربو راکتوری که آقای اوهاین آن را طرحریزی کرده بود در آسمان آلمان به پرواز درآمد. اما برای اینکه آن را برای کار و به طور صنعتی بسازند هنوز خیلی عقب بودند. بعداً کار بین ماشین سازان متعددی: یونکرس، هاینکل و BMW تقسیم شد. پیشرفت کار تقریباً به کندی پیشرفت آن در انگلستان بود و علت آن شاید تعجیل فراوانی بود که در موقعیتی استثنایی که ایجاد همکاری مطلوب در حداقل زمان دشوار بود به عمل می آمد.

کارهای یونکرس و BMW به ساخت موتورهای دارای کمپرسورهای محوری انجامید: *Jumo 004* (شکل ۹۷) و *BMW 003*، درحالی که کمپرسورهای ویتل و اوهاین از نوع مرکزگرین بودند. یکی از اولین موتورهای آنها ۹۰۰ کیلوگرم رانشی نیرو داشت و در ژانویه ۱۹۴۵ هواپیمای مسرشمیت 262 با این موتورها مجهز شدند، و حال آنکه ارتش امریکا تا دسامبر ۱۹۴۵ فاقد

1. F. Whittle    2. H. von Ohain



شکل ۹۷. توربو راکتور Jumo 004.

۱. مخزن سوخت؛ ۲. کمپرسور محوری؛ ۳. محفظه احتراق؛ ۴. توربین؛ ۵. مخروط شیپوره تنظیم پذیر؛ ۶. تلمبه روغن؛ ۷. استارتر.

هوایماهای جت بود.

تکامل توربو راکتورها: با پایان یافتن جنگ جهانی، توربو راکتورها، نخست برای هوایمایی ارتشی، سپس از سال ۱۹۶۰ برای هوایمایی کشوری بسرعت رواج یافتند.

مسأله اصلی، مانند همه موتورهای درونسوز، اساساً عبارت از افزایش بازده کمپرسور با بالا بردن میزان فشار در محفظه احتراق بود. بنابراین، تلاشها روی تکمیل کردن کمپرسور تمرکز یافت. در برهه ۱۹۴۰ - ۱۹۵۶ بازده کمپرسورهای مرکزگیز از ۷۰ به ۸۰ درصد افزایش یافت و میزان فشار از سه به چهار بالا رفت. این نتایج با روشهای تجربی به دست آمدند. اما، تکامل کمپرسور محوری، که در سال ۱۹۵۰ به طور قطعی جانشین کمپرسور مرکزگیز شد، در گرو محاسبات بسیار دشواری بود، و غالباً کار به کامپیوتر می کشید. بازده کمپرسور می توانست به ۹۰٪ برسد. انواع دیگری از کمپرسورهای محوری در سالهای ۵۰ به کار گرفته شدند، مثلاً کمپرسورهای دو بدنه ای که هر کدام توربین خود را داشتند و در صورت لزوم می توانستند با سرعتهای متفاوتی بگردند. در همین دوران و تحت تأثیر این تحقیقات بود که برپایه نقشه ای کلیتر، توربین واقعاً گازی، مراحل تکاملی پیشین را پشت سر گذاشت.

درباره توربو راکتورهای هوایماها باید یک رشته نوآوریها را به یاد آورد - نوآوریهایی که از نظر نوع راه حل برای افزایش کشش، بویژه در برخاستن از زمین به بهای افزایش کم وزن موتور بسیار جالب است. این راه حلها عبارت بودند از: احتراق بعدی، تزریق آب در محفظه احتراق و بالاخره چرخه دو جریانی.

نوآوری بسیار جالب احتراق بعدی، در واقع احتراق دومی است که در شیپوره پرتاب انجام

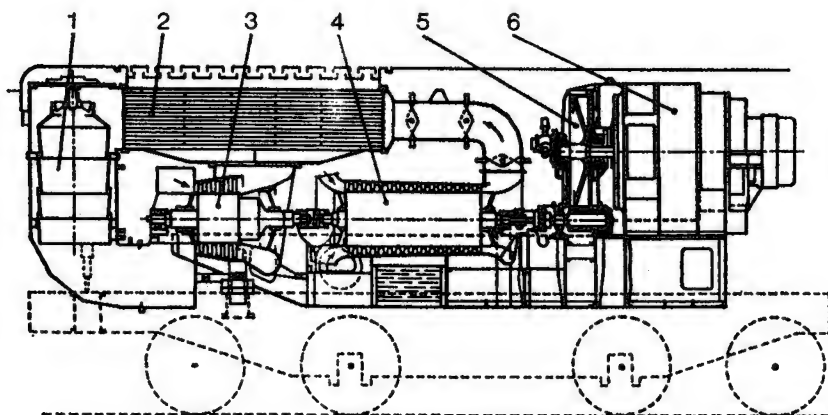
می‌گیرد. گازها به هنگام خروج از توربین، هنوز مقدار زیادی اکسیژن دارند، آنها هنوز گرم و پرفشار هستند. تزریق تازه‌ای از سوخت در شیپوره، که طبعاً برای این کار باید آماده شود سبب می‌شود که شیپوره همچون نوعی استاتور راکتور عمل کند و نیروی رانشی آن به مقدار نیروی رانشی توربو راکتوری که آن را تغذیه می‌کند افزوده شود. راکتورها که هواپیمای کنکورد را مجهز ساخته‌اند دارای دستگاه احتراق بعدی می‌باشند.

در گذشته دربارهٔ تزریق آب در توربین سخن رفت. در توربو راکتورها این کار موجب افزایش نیروی رانشی موتور تا ۲۰٪ می‌شود. از آنجا که آب زیادی را جذب می‌کند، بنابراین یک مابه‌ازای وزنی و حجمی است، این کار فقط در زمان برخاستن از زمین و بسیار بندرت از سال ۱۹۶۰ عملی شده است: چرخهٔ دو جریانی عبارت از هدایت کردن مستقیم بخشی از هوایی که از کمپرسور کم فشار خارج می‌شود به شیپوره پرتاب است، بدون اینکه این هوا از محفظهٔ احتراق و توربین بگذرد، این روش که در سال ۱۹۴۰ ابداع شد تا سال ۱۹۶۰ عملی نگردید. این کار قدرت موتور را به هنگام برخاستن از زمین بسیار بالا می‌برد و سپس در پرواز با سرعت کم، مصرف سوخت را تا ۲۰٪ و نیز سروصدا را در دهانهٔ شیپوره کم می‌کند.

این نمونه‌ها نشان می‌دهند که تکنیک توربو راکتورها هنوز امکانات پیشروی زیادی دارند. توربینهای گازی حمل و نقل: نتایجی که از توربو راکتورها به دست آمد برای جانشین کردن توربینهای گازی به جای انواع موتورهای خودرو یا تأسیسات ثابت مورد استفاده قرار گرفت.

تولید آنها در رشتهٔ راه آهن پیشرفت زیادی داشت. یکی از نخستین لوکوموتیوهای مجهز به توربین گازی تاریخ ۱۹۴۱ را بر خورده دارد، لوکوموتیوی که با توربینی با قدرت ۱۶۰۰ kW حرکت می‌کرد. این توربین را براون - باوری برای راه آهن سویس ساخت (شکل ۹۸). از این پس لوکوموتیوهای دیگر توربینی و با انتقال برقی در انگلستان و آمریکا به کار گرفته شدند. مؤسسهٔ جنرال الکتریک تعدادی از آن را ساخت که بعضی از آنها قدرتهایی برابر ۲۵۸۰، ۳۳۰۰، ۶۲۵۰ kW داشتند.

در فرانسه که در آنجا موتورهای دیزل - الکتریک در سالهای ۵۰ پیشرفت زیادی داشت، شرکت ملی راه آهن در سال ۱۹۶۶ به تحقیقاتی دربارهٔ ساخت لوکوموتیوهای توربینی دست زد. بهره‌برداری بازرگانی از توربو ترنهای اولیه در سال ۱۹۷۰ با اتصال به کمک کنورتیسور برقی و جفتگر هیدرولیکی انجام گرفت. پس از سال ۱۹۷۲ که نوع دیگری با سرعت حداکثر ۲۵۰ کیلومتر در ساعت به کار گرفته شد، نوع سومی مورد تحقیق قرار گرفت که شامل نوعی اتصال برقی بود و وسایلی که برای حرکت با برق صنعتی در آن به کار رفته بود، در گذشته در لوکوموتیوهای دیزلی به کار



شکل ۹۸. لوکوموتیو با توربین گازی، ساخت براون - باوری (۱۹۴۱).

۱. محفظه احتراق؛ ۲. تأسیسات گرمکننده هوا؛ ۳. توربین گازی؛ ۴. کمپرسور؛ ۵. جعبه دنده؛ ۶. دینام.

گرفته می‌شدند: آلترناتور سه فاز، یکسوکننده سیلیسیمی، موتورهای دارای کشش پیوسته، که اکنون آنها را برای این نوع جدید کشش آماده کرده بودند. این قطارهای جدید می‌توانستند سرعتی برابر ۳۱۸ کیلومتر در ساعت داشته باشند و زمانی که راه‌آهنهای تازه، میان پاریس و لیون (حدود ۵۰۰ کیلومتر) گشایش یافت در این مسافت می‌توانستند سرعت هواپیما را داشته باشند؛ اما به علت زیاد بودن هزینه سوخت و مشکلات مربوط به واردات فراورده‌های نفتی، که کشورهای اروپایی با آن دست و پنجه نرم می‌کنند مؤسسه SNCF<sup>۱</sup> از توسعه کاربرد توربوترنها صرفنظر کرد و ساخت ترنهای سریع‌السیر خود را با جریان برقی دنبال گرفت. در اینجا ما با نمونه‌گویی از یک نوآوری فنی روبه‌رو هستیم که به علل اقتصادی، هیچ کاربردی نیافت.

در مورد حمل‌ونقل دریایی باید گفت که نخستین توربین گازی به‌عنوان آزمایش در سال ۱۹۴۷ بوسیله متروپولیتن ویکرز در یک کشتی توپدار انگلیسی کار گذاشته شد. با آزمایشهای دیگری که انجام گرفت در سال ۱۹۵۱ یک توربین ساخت بریتیش تامسن - هوستن با قدرت ۴۰۵۰ kW به‌جای چهار دیزل یک نفتکش به نام *Auris* به‌کار گرفته شد. آزمایشهای دیگری در ممالک متحده آمریکا، در یک کشتی به نام *Liberty Ship* به‌عمل آمد و در سال ۱۹۶۵ در کشتی *John Sergeant* اقیانوس‌پیما توربینی با ۵۵۰۰ kW کار گذاشته شد.

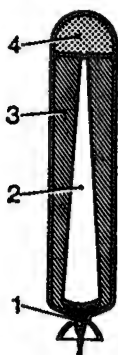
۱. Société Nationale de Chemins de fer Français، به معنای شرکت ملی راه‌آهن فرانسه. - م

برای کاربرد توربین گازی به جای موتور اتومبیل، طبعاً کارهای زیادی انجام گرفت. هر اتومبیل می‌بایست با دو توربین تجهیز می‌شد: یکی برای کمپرسور و دیگری برای حرکت دادن آن. در ماه ژوئن ۱۹۵۲ یک اتومبیل Rover مجهز با این توربینها رکورد جهانی سرعت اتومبیلها را شکست. اما مشکلات ویژه بازده، سرعت گردش، سروصدا و بهای تمام شده، مانع جدی در برابر رواج آنها بود. تأسیسات ثابت: توربین گازی از سال ۱۹۵۰ تقریباً به طور اساسی به عنوان منبع انرژی در نیروگاهها به کار گرفته شده است. طبیعی است که احساس کنیم که گسترش راه حلها نسبتاً متناسب با تنوع نیازهایی بودند که باید رفع شوند و نیز شرایط کاربرد: تعداد محفظه‌های احتراق؛ خنک‌سازی با هوا؛ کاربرد یا عدم کاربرد وسایل بازیابی گرما؛ دسته‌بندی محورها روی یک یا چند ردیف. نوعی که بیشترین رواج را یافت دارای یک بازبانده گرما و یک وسیله گرم‌کننده مجدد و نیز خنک‌سازی بینابینی است که مورد نیاز محفظه‌های احتراق متعدد است. این راه حل مستلزم هزینه ساخت گزاف اما بازده خوبی است که زمانی که توربین مدت زیادی با تمام قدرت کار می‌کند ضروری باشد.

نخستین تأسیسات را در این زمینه، مؤسسه براون - باوری برای نیروگاههای بتسناو<sup>۱</sup> واقع در سویس و لیورنو در ایتالیا در ۱۹۴۵، و پورت من<sup>۲</sup>، واقع در کانادا ۱۹۵۹ برپا کرد. نیروگاه بتسناو دو توربین گازی داشت با قدرتهای ۲۷۰۰۰ kW - ۱۳۰۰۰؛ نیروگاه لیورنو دو گروه و از آن پورت من چهار گروه توربین گازی داشت که هر یک ۲۵۰۰۰ kW قدرت داشتند. در سالهای ۶۰ تقریباً همه مؤسسات بزرگ به ساخت آن می‌پرداختند. مؤسسات انگلیسی و امریکایی مدلهایی را که برای توربو راکتورهای هواپیما طرح شده بودند تکامل بخشیدند در فرانسه، SNECMA در سال ۱۹۶۳ یک گروه ۱۰۰۰۰ kW را برپا کرد. این گروه با ویژگی‌های دستگاههای گازساز، دارای یک توربو راکتور ATAR 09 بود که این مؤسسه برای هواپیماهای جنگی میزبان ساخته بود. بدین ترتیب، روشن می‌شود که جنبه‌های مختلف این رشته تا چه اندازه با یکدیگر ارتباط تنگاتنگ دارند.

تکامل توربینهای گازی سرانجام به طرح موتوری انجامید که فراتر از موتورهای درونسوز به معنای دقیق کلمه بود؛ یعنی توربینهایی که در آنها گاز یک مدار بسته را طی می‌کرد. به عبارت دیگر یک جرم گازی در مداری منفرد از جو، با فشاری که طوری محاسبه شده است که توان موتور را متناسب با ابعاد آن، افزایش دهد. این نوع توربین در سال ۱۹۰۰ بوسیله کنوریک<sup>۳</sup> و نادروفسکی<sup>۴</sup> طرح شده بود و تنها پس از جنگ جهانی دوم بود که آقایان آکرت<sup>۵</sup> و کلر<sup>۶</sup> در مؤسسه اشرویس<sup>۷</sup> زوربخ آن را ساختند. این توربین حتی از نظر اصول به موتورهای هوای گرم استرلینگ شباهت

1. Beznau 2. Portmann 3. Knorrig 4. Nadrowsky 5. Ackeret 6. Keller  
7. Escher-Wyss



شکل ۹۹. موشک باروتی ۱. شیپوره پرتاب؛ ۲. جان مخروطی؛ ۳. باروت سیاه؛ ۴. رأس انباشته.

داشت. با نمونه اخیر بدون تردید بخوبی فهمیده می شود که مجموعه موتورهای حرارتی در سراسر تاریخ خود با همان تنوع زیاد اصول کار، تا چه اندازه یک کل نسبتاً همگون را تشکیل می دهند.

### موتورهای موشکی

تاریخ پیدایش موشکها هم مانند تاریخ باروت سیاه مبهم است. تاریخ معینی را نمی توان پیشنهاد کرد زیرا نوشته هایی که درباره سلاحهای قدیم در دست است مبهم می باشند و اظهارنظر درباره اینکه فلان سلاح با موشک فرستاده می شد یا تنها آتشین بود کار بسیار دشواری است.

موتورهای درونسوز اولیه بسیار ساده بودند. موتور موشکی نوعی موتور جت است که انرژی شیمیایی یک مخلوط سوختی و ماده سوزا (اکسیدکننده سوخت) را، که مدت زیادی باروت سیاه بود، مستقیماً به انرژی جنبشی تغییر شکل می دهد.

موتور موشکی باروتی در آغاز به طور ساده از یک استوانه چوبی یا مقوایی و بعدها آهنی که یک سر آن بسته بود تشکیل می شد. این استوانه درعین حال کار محفظه احتراق، مخزن سوخت و شیپوره را انجام می داد. باروت درون استوانه چنان سنبه کاری می شد که در محور به اصطلاح «جان موشک» خلأیی به شکل مخروط ناقص ایجاد شود. این کار سبب می شد تا سطح احتراق افزایش و فرار گازها شدت گیرد (شکل ۹۹)

فشار درون استوانه، نسبتاً پایین بود و دمای احتراق میان ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ درجه نوسان داشت. در فرصتهای به دست آمده اشاره ای به موشکهای قدیم دیده شد که اگر هم اصول کار احتمالاً



حدود آغاز قرون وسطی شناخته شده است، کاربرد آنها طی چندین سده بندرت انجام گرفته است. گاهی از کاربرد آنها در عملیات جنگی، ایجاد آتش‌سوزی در ناوها یا شهرها یاد شده است، بدون اینکه این سلاح کاربردی کلی داشته باشد. بهترین موفقیت آنها در آتش‌بازیهای اعیاد بود. در پایان سده هفدهم، خانواده روجری<sup>۱</sup> در این هنر اشتهار فراوان به‌دست آورده بود.

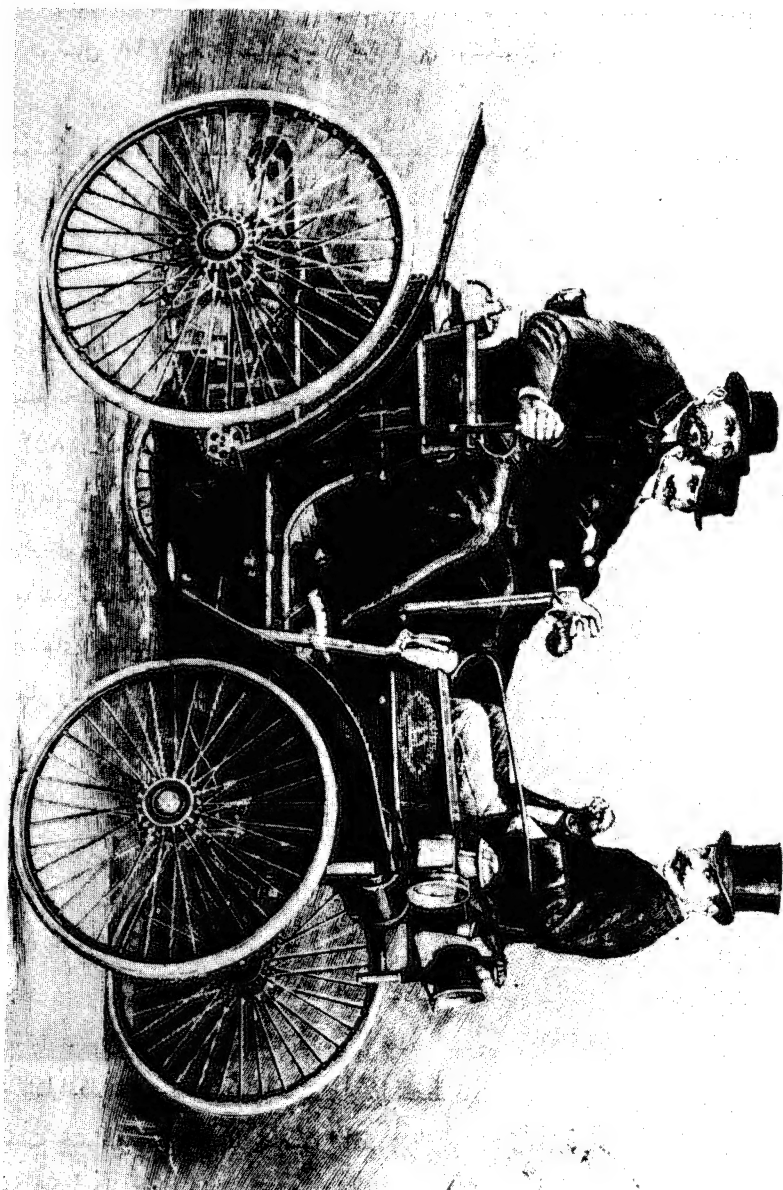
طی این مدت طولانی، در چین و اروپا، که چیز زیادی به‌اصول بسیار ساده این کار که رواج بسیاری یافته بود، نیافزودند نوشته‌های فراوانی انتشار یافت. چند اصلاحی در مورد محاسبه نسبت قطر به ارتفاع استوانه، که معمولاً در موشکهای کوچک ۱/۶ و در موشکهای بزرگ ۱/۴ بود و نیز ترکیب مخلوط پيشرانه، که همگی برپایه باروت بودند، نحوه تأمین استحکام و هدایت موشکها به‌عمل آمد. پره‌های حفظ تعادل، گویا تنها در آغاز سده هجدهم به‌کار گرفته شدند. موشکهای چند مرحله‌ای در آغاز سده شانزدهم ساخته می‌شدند. نوشته کازیمیر سیمینوویچ، مهندس لهستانی با عنوان *Artis Magnae Artilleriae* که در سال ۱۶۵۰ در آمستردام چاپ شد همه اطلاعات درباره این موضوع را که بیش از دو سده هیچ تغییری در آن راه نیافته بود، شامل می‌شد.

نخستین کاربرد منظم موشکها را ارتش انگلیس در جنگهای امپراطوری انجام داده است و گویا کشورهای دیگر در سده نوزدهم از این نمونه تقلید کرده‌اند. در این دوران مخلوط سوخت و سوزا هنوز مانند قبل از آن، جامد بود. مواد پروپرگول جامد، در زمان ما هم مصرف می‌شود؛ اما ویژگی سوخت جدید، مایع بودن پروپرگولهاست. برای اینکه شرح تاریخ آشفته این اختراع تا حدودی نظم پذیرد، نخست از کاربرد پروپرگولهای جامد و سپس از انواع مایع آن سخن خواهیم راند. کلمه پروپرگول، که یک واژه ثبت شده است گویا از زمان جنگ جهانی دوم وارد فهرست واژگان جدید شده است و معنی بسیار کلی دارد.

### موتورهای موشکی با پروپرگولهای جامد

آقای ویلیام کانگریو<sup>۲</sup> ژنرال انگلیسی که ریاست تسلیحات وولچ<sup>۳</sup> با او بود بررسیهای نخستین روی کاربرد موشک به‌عنوان یک سلاح را آغاز کرد؛ علت این امر مشاهداتی بود که خود وی از تأثیر این سلاح روی ارتشهای هند در سال ۱۷۹۹ داشت. وی در سال ۱۸۰۶ از این اسلحه علیه اردوگاه بولونی استفاده کرده بود اما بویژه در سال بعد از آن علیه شهر کپنهاگ، که ۲۰۰۰۰ موشک طی چهار روز به‌سوی آن شهر پرتاب شد، از این سلاح استفاده کرد.

1. Ruggerie 2. W. Congreve 3. Woolwich



تابلوی ۹: یکی از نخستین خودروهای پژو (حدود ۱۸۹۰).

اصلاحات نظامی: چنین می‌نماید، مدارکی هم در دست است که افسری فرانسوی با نام پره‌وو<sup>۱</sup> افتخار وارد کردن دوباره موشک جنگی را به اروپا و نیز بهتر کردن دقت تیر آن را دارد. این افسر در سال ۱۷۹۸ در سباستوپول مرد. وی موشکهای آتشزایی با آتش یونانی ساخته است.

این موشکها را بعدها انگلیسیان در جنگهای فلسینگ<sup>۲</sup>، ویتنبرگ<sup>۳</sup>، دانسیک، لایزیک (۱۸۱۳) و بعد در امریکا در ۱۸۱۴ به‌کار بردند. این موشکها ۵۰، ۸۰ و ۱۲۰ میلیمتر قطر داشتند؛ برد آنها ۳۰۰ متر بود که از برد توپهای معمول در آن زمان تجاوز می‌کرد.

کشورهای دیگر به این موشکها علاقه‌مند شدند: دانمارک، اتریش، امریکا، ایتالیا آن را در تسلیحات خود وارد کردند.

در نیمه نخست سده نوزدهم موتورهای موشکی روزبه‌روز نیرومندتر شدند به‌طوری‌که در جنگهای ۱۸۵۴ - ۱۸۵۵ سباستوپول، خرج آنها به ۸۰ پوند و بردشان به هفت کیلومتر رسید. برای آزمایش قدرت موتورها در مدرسه و مهندسی مس (در ۳۰۰ کیلومتری شرق پاریس) از شلیک کردن موشک صرف‌نظر کردند و با فنرهای یک توانسنج (دینامومتر) ثابت‌دار توان آن را سنجیدند و، بدین‌ترتیب، توانستند نیروی فزون‌بنده آن را در هر لحظه تعیین کنند. شاید این را نخستین پایگاه آزمایشهای استاتیکی بتوان دانست. نتیجه این بررسیها اطلاع بر چگونگی پروپروگولهای جامد گوناگون به‌کار رفته و نیز بررسی شکل محفظه احتراق بود. معلوم شد که یک «جان استوانه‌ای» بیش از یک «جان مخروطی» که تا آن زمان معمول بود تأثیر دارد.

همین‌طور، مقدار کویدن خرج موشک با یک توانسنج همراه شد تا فشار ایجاد شده معلوم باشد و بدین‌ترتیب از انفجار موشک پرهیز شود. سیستم آتش کردن نیز با استفاده از وسیله‌ای که به‌طور مکانیکی مشتعل می‌شد و شعله آن قدر دوام می‌یافت تا باروت آتش بگیرد، بهتر شد.

اما برای یکبار دیگر هم، موشک در زمینه نظامی در برابر توپ سر تعظیم فرود آورد. در این زمان لوله‌های خاندار و باروت بی‌دود پدید آمده بودند و بنابراین تیراندازی با توپخانه دقت قابل توجهی یافت؛ بدین‌ترتیب، از نو موشک از میدان جنگ بیرون شد (۱۸۶۶) در اتریش، ۱۸۷۲ در فرانسه)، و تنها انگلستان بود که به‌طور سنتی آن را حفظ کرد.

با گذشت چند دهه، موشک باز به میدان آمد. ژنرال روسی کنستانتینوف در پایان سده نوزدهم و بارون فون اوگه<sup>۴</sup> در آغاز سده بیستم، در پی ایجاد چند اصلاح در آن شدند. اوگه به یک رشته آزمایش برای استفاده از موتور موشکی در اژدرها دست زد. نخستین جنگ جهانی شاهد فعالیت

1. Prevost 2. Flessingue 3. Wittenberg 4. B. von Uge



تابلوی ۱۰. موتور آزمایشی رودلف دیزل (۱۸۹۳).

تازه موشکها بود. از آنها بویژه برای از بین بردن بالونهای دشمن، فرستادن پیامهایی در آسمان شب و نیز ساخت موشکهای رسام استفاده شد.

در پایان سده نوزدهم و آغاز سده بیستم به جست و جوی راههایی برای استفاده از موشکها برای مقاصدی برآمدند که کمتر مرگ‌آور باشد.

در سال ۱۸۶۵ آقای بویسون<sup>۱</sup> اختراعی برای استفاده از موشک به عنوان موتور هواپیما به ثبت رسانید. آقای آمده دنی در فرانسه و ل. رورمان<sup>۲</sup> در آلمان در پایان سده نوزدهم کاربرد موشک را برای عکسبرداری هوایی پایه گذارند.

کارهای ر. گدارد: فیزیکدان امریکایی آقای رابرت گدارد که برای یافتن وسایلی جهت کشف لایه‌های بالای جو در سالهای ۱۹۱۳ - ۱۹۱۹ می‌کوشید کارهای منظم فراوانی در زمینه پیشرفت موشکها انجام داده است.

رابرت گدارد درباره موشکهای دارای سوخت باروت سیاه یا باروت بی دود مطالعات ارزشمندی دارد. وی در سال ۱۹۱۳ درباره موشک دو مرحله‌ای و در ۱۹۱۴ برای ساختن موتور موشکی که با فشنگهایی به طور خودکار یکی پس از دیگری در محور شیپوره آن جای می‌گرفت امتیازاتی را به ثبت رسانید.

آقای گدارد در برهه ۱۹۱۵ - ۱۹۸۱ توانست بازده موتور موشکی را تا ۶۵٪ افزایش دهد؛ این توفیق اساساً به برکت افزایش سرعت گازهای پرتاب‌شونده به دست آمد. وی برای تحقیقات خود از وسیله‌ای استفاده می‌کرد که از یک محفظه احتراق و مکانیسمی از لوله‌ها با طولهای متفاوت تشکیل می‌شد. این وسیله به وی امکان می‌داد که نسبت محفظه احتراق به شیپوره را به طور پیوسته تغییر دهد و سرعت پرتاب گازها و بازده حرارتی را محاسبه کند. او بدین ترتیب بهترین شکل شیپوره را به دست آورد.

آقای گدارد در سال ۱۹۱۹ نتایج تحقیقات خود را روی موتور موشکی با سوخت جامد انتشار داد. نتیجه‌گیرهای وی در مورد این موتور بدبینانه بود. وی اندیشید که موشک با پروپرگول جامد نمی‌تواند تا ارتفاع مورد نظر بالا رود و بنابراین وی از آغاز سال ۱۹۲۰ کوشید تا سوخت مایعی برای موشکها تهیه کند. این مطلب بعداً شرح داده خواهد شد.

هرچند که پس از این تاریخ موتور موشکی با سوخت مایع پیشرفت زیادی داشت و موشکهای با سوخت جامد را تحت الشعاع قرار داد، موشکهای اخیر بکلی کنار گذاشته نشدند و به عنوان موتور کمکی موشکهای دارای سوخت مایع مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

در فرانسه، تحقیقات مفیدی بوسیله مدرسه ملی پیشه و هنر، از ۱۹۱۶ به مدت سی سال با سرپرستی هانری ف. ملو<sup>۱</sup> روی موشکهای دارای سوخت جامد به عمل آمد. هدف این تحقیقات استفاده از این موتورهای کمکی برای سرعت دادن به هواپیما بود. موتورهای موشکی با سوخت باروت سیاه هم بوسیله آقای لویی دامبلان<sup>۲</sup> (بین سالهای ۱۹۳۲ - ۱۹۳۵) برای موشکهای پیامرسانی، و نیز در مؤسسه پیروتکنیک شهر روجری و نیز مدرسه پیروتکنیک شهرستان بورژ مورد مطالعه قرار گرفتند. در اینجا باید اشاره‌ای هم به کارهای اسنو-پلتری کرده باشیم، که برای سرعت دادن بمبها، موتورهای موشکی ۸۰ میلیمتری را مورد مطالعه قرار داد.

کارهای آلمانیها: در آلمان، موشکهای باروتی، که نخستین موشکهایی بودند که برای حرکت انواع وسایل نقلیه به کار گرفته شدند بوسیله فریدریک ویلهلم زاندر<sup>۳</sup> ساخته می شدند. آقای ماکس والیر<sup>۴</sup> با آقای فریتس فون اوپل (کارخانه دار بزرگ اتومبیل سازی) و آقای زاندر ماشین ساز در سال ۱۹۲۸ نخستین خودروی را که با موشک حرکت می کرد ساختند. روی این خودرو به جای موتور و وسیله انتقال حرکت، یک موشک نصب شده بود.

در همین سال ماکس والیر خودرویی ساخت که روی ریل حرکت می کرد و خودروی دیگری که روی برف می لغزید. هر دو خودرو به موتور موشکی مجهز بودند.

باز در سال ۱۹۲۸ بود که نخستین هواپیمای با موتور موشکی به پرواز درآمد. در آغاز گلايدر *Ente* بود که سازندگان هواپیماهای بی موتور رون-روستین<sup>۵</sup> آن را ساخته بودند. این هواپیما در ۱۱ ژوئن ۱۹۲۸ به کمک دو موشک زاندر، پرواز کرد و در ۳۰ سپتامبر آقای فریتس فون اوپل یک گلايدر دارای شش موشک زاندر را خلبانی کرد و با آن سرعتی برابر ۱۵۰ کیلومتر در ساعت داشت. در سالهای ۳۰ آقایان راینهولد تیلینگ<sup>۶</sup>، فریدریش اشمیدل<sup>۷</sup> و گرهارت تسوکر<sup>۸</sup> دست به کار ساخت موشکهای با سوخت پروپروکل جامد، برای حمل مکاتبات پستی شدند. سپس در پایان این سالها و در آستانه جنگ جهانی دوم و طی آن، موتورهای موشکی با سوخت جامد و نیز با سوخت مایع، به علت کاربردها در مقاصد ارتشی، تکان دیگری در جهت تکامل دریافت داشتند.

در آلمان موتورهای موشکی با سوخت جامد را که شرکت *Schmidding Dynamit A. G.* می ساخت به عنوان موتور شتاب دهنده برای اینکه هواپیماهای سنگین از زمین برخیزند، و نیز به عنوان موتور تعدادی موشک زمین- هوا و زمین- زمین، موشکهای ضدتانک و موشک هوا- زمین به کار گرفته شدند.

اثرات جنگ جهانی دوم: بریتانیای کبیر تحت تأثیر روحیهٔ محافظه‌کاری، تنها کشوری بود که موشک‌های با سوخت پروپرگول جامد در آنجا مورد نظر بود. در سال ۱۹۳۵ تحت نظر آقای الوین داگلس کراو<sup>۱</sup> در تسلیحات وولچ کارهایی برای راه‌اندازی موتورهای موشکی با باروت بیدود، کوردیت، انجام گرفت. با بهره‌گیری از این تحقیقات، در آغاز جنگ جهانی دوم، انگلستان در رشتهٔ ساخت موشک‌های با سوخت جامد پیشرفته‌ترین کشور بود و ممالک متحدهٔ امریکا از اطلاعات انگلستان استفاده می‌کرد. موتورهای موشکی انگلستان برای همان مقاصدی به‌کار گرفته شدند که موتورهای موشکی آلمان.

در ممالک متحده امریکا، آقای لسللی استینر<sup>۲</sup> سرشناسترین محقق بود که در رشته موشک‌های با سوخت جامد کار می‌کرد. تعدادی باروتهای دارای ترکیب ساده و دو پایه مورد آزمایش قرار گرفتند که بهترین آنها مبنای پرکلرات پتاسیم و آسفالت داشت. در زمان جنگ جهانی دوم، بر این پایه موتورهایی با نیروی رانشی ۱۰۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ کیلوگرم داشتند و از آنها به‌عنوان موتورهای کمکی برای برخاستن هواپیما از زمین استفاده می‌شد. کاربردهای ارتشی دیگری با موتورهای موشکی ایجاد شدند، از جمله می‌توان از بازو، سلاحهای ضدتانک با برد کم نام برد.

حدود پایان جنگ، در چارچوب برنامهٔ Wac-corporal، قویترین موتور با سوخت پروپرگول جامد ساخته شد که نیروی رانشی آن در ۰/۶ ثانیه ۲۳۰۰۰ کیلوگرم بود و به‌عنوان موتور شتاب‌دهنده برای برخاستن موشک از زمین به‌کار گرفته شد. بعدها این موتور جای خود را به موتوری با پروپرگول مایع داد. در اتحاد جماهیر شوروی سابق در سال ۱۹۳۶ موتورهایی با پروپرگول جامد ساخته شد، که به ساخت موتورهای معروف کاتیوشا با باروت دو پایه انجامید.

پس از جنگ دوم ساختن موتورهای موشکی با سوخت جامد با شدت، بویژه در امریکا، به‌علت کاربرد آن در زمینهٔ ارتشی دنبال شد.

در آغاز کار، این موتورها از نظر توان در ردیف پایین‌تر موتورهای با سوخت پروپرگول مایع جای داشتند اما در دههٔ ۱۹۵۰ بر اثر پیشرفتهایی که در ساختمان آن ایجاد شد و به‌کارگیری پروپرگولهای جامد جدید، اختلاف برد این دو نوع موشک، اندک شد. وانگهی این موتورها بسیار ساده و نیز ارزان بودند و ترکیب سوخت آنها قابل تغییر بود؛ این سوخت را می‌شد انبار کرد و کمتر خطرناک بود. با این‌همه آنها به‌علت امکان‌ناپذیر بودن خاموش کردن، اشتعال مجدد و نیز کنترل کردن و تغییر دادن مقدار بُرد، رواج زیادی نیافتند.

پس از جنگ جهانی دوم بود که نخستین موشک چند مرحله‌ای ساخته شد. پیش بردن

مراحل مختلف یا با موتورهای دارای سوخت جامد با سوخت مایع انجام می‌گرفت. به‌طور کلی، نوع ساختمان و نیز ترکیب پروپروگولها، جزء اسرار نظامی است.

در آمریکا، پس از جنگ جهانی دوم، از پروپروگولهای جامد نخست برای موتورهای ویژه برخاستن هواپیماهای *Snark* (هواپیمای موشک‌انداز با سرعت کمتر از صوت) از زمین استفاده می‌شد و بعدها در سالهای ۵۰ یک موتور با سوخت جامد را مؤسسه Jet Propulsion Laboratory برای موشک *Hermes A2* ساخت. تعداد زیادی موشکهای با برد کم با این نوع موتور مجهز شدند.

بعدها این موتورها با افزایش توان و برتریهایی که داشتند بر روی موشکهای با برد بلند گذاشته شدند. جوپیتر که نخستین موشک آمریکا با برد متوسط بود شامل یک مرحله دوم با ردیفی از یازده موتور موشکی بود و یک مرحله سوم که سه موتور موشکی آن را حرکت می‌داد. سوخت همه موتورها پروپروگول جامد بود. پولاریس هم که پس از ۱۹۶۰ ساخته شد دو مرحله‌ای با برد ۴۷۰۰ کیلومتر بود که از زیردریایی پرتاب می‌شد و مینوتمن سه مرحله‌ای با برد ۱۲۰۰۰ کیلومتر بود.

نخستین موشک فضاپیمای آمریکا وانگارد که برای نخستین بار در سال ۱۹۵۷ به فضا پرتاب شد، سه مرحله‌ای و با سوخت جامد بود. شمار زیادی موشک هواشناسی نیز با سوختهای جامد پرتاب شده‌اند.

اتحاد جماهیر شوروی سابق نیز موتورهای موشکی با سوخت جامد تقریباً برای همین منظورها ساخته است. تقریباً می‌توان در همه کشورها این کارها را دید برخی آزمایشهای پیش از جنگ خود را دنبال می‌کنند و عده‌ای نیز دنباله‌روی کشورهای پیشگام هستند.

### موتورهای موشکی با پروپروگولهای مایع

در اواخر سده نوزدهم و اوایل سده بیستم، پژوهشگران که بویژه امید به کشفیات فضایی آنان را دلگرم می‌ساخت در تکامل موتورهای موشکی با به‌کارگیری سوختهای تازه، بخصوص مایع می‌کوشیدند. گرچه اصول کار موتورهای با سوخت جامد و مایع تفاوتی با هم نداشتند، موتورهای با سوخت مایع آشکارا پیچیده‌تر بودند. محفظه احتراق آنها از مخزن (یا مخازن) سوخت جدا بود و موتور به مکانیسم تغذیه و خنک‌سازی نیاز داشت.

گرچه در آغاز، پژوهشگران کشورهای مختلف (بویژه آلمان، ممالک متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق) برای تکامل و شکوفایی اختراع موشک با یکدیگر همکاری داشتند و از



دستاوردها و ساخته‌های خود، همکاران را بی‌اطلاع نمی‌گذاشتند، پس از مدت کوتاهی، همه این رشته صنعت در پرده اسرار نظامی پوشیده شد، همان‌طور که در سالهای ۳۰ اطلاعات مربوط به سوخت جامد در ردیف اسرار ارتشی قرار گرفت. بنابراین راه‌حلهای اساسی و تکمیلیها غالباً بوسیله پژوهشگرانی که از کارهای کشورهای دیگر بیخبر بودند انجام می‌گرفت و تاریخ موتورهای موشکی تاریخی است که در چند کشور موازی با یکدیگر نوشته شده است.

نخستین موتورهای با سوخت مایع: موتورهای موشکی با سوخت مایع، معمولاً با دو نوع پروپرگول کار می‌کنند: سوخت و سوزا؛ گرچه بعدها موتورهایی با سوخت تکی (monergol) ساخته شدند، که در آینده درباره آنها سخن خواهیم گفت.

کهنترین نماینده موتورهای موشکی با سوخت مایع مربوط به سال ۱۹۰۳ می‌شود و ساخته دانشمندی روسی با نام تسیولکوفسکی است. پروپرگولهایی که وی از آنها نام می‌برد در ردیف بهترین سوخته‌های این زمان است: اکسیژن مایع و هیدروژن مایع.

اما آقای تسیولکوفسکی زندگی خود را وقف ساخت و آزمایش موتورهای موشکی نکرد و همه کوششهای خود را بر جنبه‌های نظری حرکت در اثر عکس‌العمل در فرضیه پروازهای بین ستارگان متمرکز ساخت. وی در سال ۱۹۰۳ بروشوری با عنوان: پژوهشهایی برای اکتشافات کیهانی به کمک وسایل واکنشی انتشار داد و در آن برای نخستین بار در جهان ثابت کرد که تنها وسیله فرار از جاذبه زمین، استفاده از موشک است، موتوری که می‌تواند در خلأ حرکت کند. آقای تسیولکوفسکی بدین طریق کاربرد موشکهای چند مرحله‌ای را که وی «ترن موشکها» می‌نامد پایه گذارد. گرچه وی نظرات شجاعانه‌ای طرح کرده است کارهای وی بدون دنباله بودند.

نخستین موتور موشکی با سوخت مایع را آقای پذیرو آ. پوله<sup>۱</sup>، مهندس شیمی اهل پرو در برهه ۱۸۹۵-۱۸۹۷ در پاریس ساخته است، اما کارهای وی تا مدتها ناشناخته ماند، موتور وی کوچک و محفظه احتراق آن از فولاد بود که با سوخت پروکسیدنیتروژن و بنزین کار می‌کرد. یک شمع الکتریکی آن را مشتعل می‌ساخت. این موتور می‌توانست با هر ۳۰۰ انفجار در دقیقه، نیروی رانشی برابر ۱۰۰ کیلوگرم ایجاد کند. این ارقام را آقای پوله در سال ۱۹۲۷ زمانی که قصد داشت کارهایش را شروع کند، داده است.

در سالهای ۱۹۰۵-۱۹۰۷ آقای بیرکلند<sup>۲</sup> نروژی نیز درباره موشکی که بویژه با سوخته‌های اکسیژن و هیدروژن مایع کار می‌کند پژوهشهایی کرده است.

سهم آقای گذارد: نخستین پژوهشهای پیگیر از آن آقای گذارد پس از سال ۱۹۲۰ است. سالی که موتورهای موشکی با سوخت جامد را به کناری نهاد.

در سالهای ۱۹۲۰-۱۹۲۵ در آزمایشگاه خود اثرات پروپرگولهای مایع (اکسیژن، پروپان، اتر، ...) را آزمایش می‌کرد. نخستین آزمایش استاتیک یک موتور موشکی با سوخت بنزینی و اکسیژن مایع در روز ۶ دسامبر ۱۹۲۵ انجام گرفت. موتور وی مدت ۲۴ ثانیه کار کرد. در روز ۱۶ مارس ۱۹۲۶ نخستین پرواز موشکی با سوخت مایع به مدت ۲ و نیم ثانیه و سرعتی برابر ۱۰۰ کیلومتر در ساعت در اوپرن انجام گرفت. در سالهای پس از آن آزمایشهایی بویژه در کمپ دونس<sup>۱</sup> (ماساچوستس) انجام گرفت.

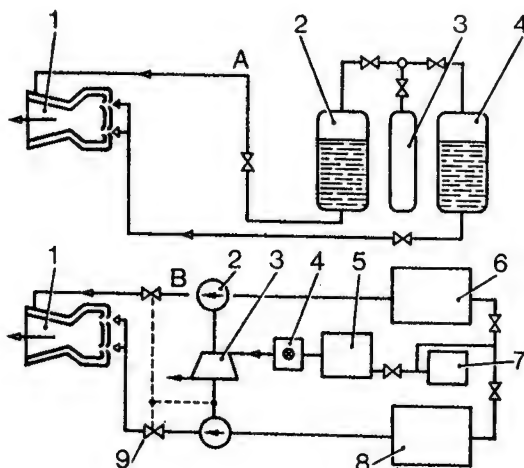
در سال ۱۹۳۲ آقای گذارد در رزول<sup>۲</sup> به تعدادی آزمایشهای استاتیک با یک موتور ۱۴۶ میلیمتری با سوخت اکسیژن و بنزین دست زد. این موتور را بر یک موشک سوار کردند این موشک در ارتفاع ۲۵۰۰ متری با سرعت ۱۱۸۵ کیلومتر در ساعت پرواز کرد. آقای گذارد در سال ۱۹۳۱ امتیاز اختراع هواپیمایی با موتور موشکی را به ثبت رسانید.

گذارد در سالهای ۱۹۳۸-۱۹۳۹ به یک رشته آزمایشهایی درباره تغذیه موتور دست زد. در واقع وی دو سیستم اصلی تغذیه را به کار برد: سیستم توربوپمپ و سیستمی که برپایه فشار گاز خنثی عمل می‌کرد (شکل ۱۰۰).

وی پس از اینکه در آغاز از تلمبه استفاده کرد و بعد از فشار گاز نیتروژن، در سال ۱۹۳۹ به روش تغذیه با تلمبه، که دو کیلوگرم اکسیژن و ۱/۵ کیلوگرم بنزین در هر ثانیه می‌سوزانید نیروی رانشی موتور را به ۳۱۸ کیلوگرم رسانید.

طولانیترین مدت کار در زمان آزمایشهای استاتیک در ۱۱ نوئن ۱۹۴۰ انجام گرفت و آن ۴۲ و ۵/۰ ثانیه بود و بزرگترین نیروی رانشی در ژانویه ۱۹۴۱ که ۴۲۷ کیلوگرم بود. پس از این تاریخ آزمایشها در زمان جنگ شتابان شدند. گذارد در سال ۱۹۴۳ با همه کارکنان خود به آنابولیس (ماریلند) منتقل شد تا در آنجا موشکی با سوخت مایع برای برخاستن هیدراوین (هیدروپلین، هواپیمایی که می‌تواند روی آب فرود آید یا از روی آن برخیزد) از روی آب بسازند.

علاوه بر تسیولکوفسکی و گذارد، موشکهای جدید دو پایه گذار بزرگ دارند: اسنو-پلتری و هرمان اوپرت<sup>۳</sup>. در فرانسه، اسنو-پلتری در سالهای ۱۹۲۹-۱۹۳۱ کاربرد بنزین و اکسیژن مایع، بعد پروکسید نیتروژن و بنزین، سرانجام تترانیترومتان و اکسیژن مایع را آزمایش کردند. این دوره برای به دست آوردن نتایج قابل استفاده هنوز بسیار زود بود.

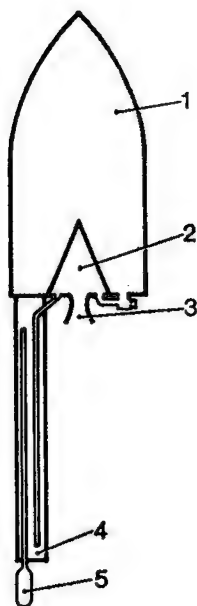


شکل ۱۰۰. دو سیستم اصلی تغذیه موشک با سوخت مایع.

A: تغذیه بوسیله گاز متراکم؛ ۱. محفظه احتراق؛ ۲. مخزن سوخت؛ ۳. مخزن گاز متراکم؛ ۴. مخزن سوزا.  
B: تغذیه بوسیله تلمبه؛ ۱. محفظه احتراق؛ ۲. تلمبه تغذیه؛ ۳. توربین گازی؛ ۴. دستگاه گازساز؛ ۵. مخزن هیدروژن پراکسید؛ ۶. مخزن سوخت؛ ۷. مخزن گاز متراکم؛ ۸. مخزن سوزا؛ ۹. مکانیسم رگلاژ.

شروع سلسله موشکهای آلمانی: آقای هرمان اوپرت در شهر سیبوی<sup>۱</sup> (در رومانی) زاده شد، اما نوشته‌ها و بیشتر تحقیقات خود را در آلمان انجام داده است. وی در ۱۹۱۷ به وزیر جنگ آلمان پیشنهاد ساخت موشکی با برد زیاد و سوخت مایع برای بمباران دشمن ارائه داد. در سال ۱۹۲۰ نخستین اثر خود را منتشر کرد که با نام «موشک در فضاهای کیهانی» هنوز شهرت دارد و دومین اثر را در ۱۹۲۹ با عنوان «مسیر سفرهای فضایی» انتشار داد. این دو اثر نه تنها از نظر اندیشه مندرج در آنها در زمینه فضاپویی و موشک مهم می‌باشند بلکه به علت علاقه شدیدی که نسبت بدین رشته در دانشمندان برانگیختند نیز ارزش فراوان دارند.

آقای اوپرت که بیشتر نظریه پرداز بود تا تجربه گر، بیش از چند موشک نساخت. در سال ۱۹۳۰ یک موتور تجربی کوچکی به نام Kegeldüse ساخت که محفظه احتراق آن بخوبی کار می‌کرد و از آزمایش در کار استاتیکی بخوبی برآمد. اوپرت در همان سال برای چندین سال به عنوان استاد ریاضی به رومانی بازگشت.



شکل ۱۰۱. موشک میراک ۱.

۱. مخزن اکسیژن مایع؛ محفظه احتراق؛ ۳. شیپوره پرتاب؛ مخزن بنزین؛ ۵. مخزن گازکربنیک تحت فشار.

در آلمان متفنین در موشک‌سازی و فضاپویی در سال ۱۹۲۷ تشکیل جمعیت مسافران فضایی<sup>۱</sup> را دادند که در سال ۱۹۲۹ اوبرت به ریاست آن برگزیده شد و روزنامه Die Rakete را منتشر ساخت.

پس از بازگشت اوبرت به رومانی، شاگردان و همکاران وی، بویژه آقایان: رودلف نبل<sup>۲</sup>، کلاوس ریدل<sup>۳</sup>، ویلی لای<sup>۴</sup> و ورنر فون براون<sup>۵</sup> به مطالعات خود روی موشکهای با سوخت مایع ادامه دادند. آنان موشکهای *Mirak I* و *II* را ساختند که موتورهای آنها از مس بود و از سوخت اکسیژن مایع و بنزین استفاده می‌کردند. کار تغذیه این موتورها با فشار گازکربنیک انجام می‌گرفت و خنک شدن آن با قرار داشتن موتور در مخزن اکسیژن مایع تأمین شده بود (شکل ۱۰۱).

در آزمایش کارهای استاتیک در سال ۱۹۳۱، موتور میراک ۱۱ در مدت ۱۲ ثانیه، ۳۰ کیلوگرم

1. Verein für Raumschiffahrt 2. R. Nebel 3. K. Riedel 4. Willy Ley 5. Wernher von Braun

نیروی رانشی داشت. هر دو میراک سرانجام در جریان آزمایشها به علت نقص در سیستم خنک‌سازی آنها که به اندازه کافی حرارت را جذب نمی‌کرد منفجر شدند. موتور جدیدی از آلومینیم مجهز به سیستم خنک‌سازی با جریان آب ساخته شد. این موتور روی موشک *Repulsor 1* گذاشته شد. این موشک در ۱۴ ماه مه ۱۹۳۱ پرتاب شد و دومین موشک اروپایی بود که با سوخت مایع پرواز کرده بود. پس از آن موشک ساخت یوهانس وینکلر<sup>۱</sup> بود که با مخلوطی از متان و اکسیژن مایع به عنوان سوخت پرواز کرد. این موشک در ۱۴ مارس ۱۹۳۱ در دسائو<sup>۲</sup> در جنوب غربی برلین تا ارتفاع ۳۰۰ متری بالا رفت. در سالهای ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ چندین موشک از نوع رپولسور پرتاب شدند. در سال ۱۹۳۲ ارتش تحقیقات کشوری را در این زمینه قدغن کرد و آن را در فهرست کارهای سری ارتش گنجانید.

آقای ورنر فون براون، کارشناس نامبردار موشک به بررسی‌های خود در این رشته به عنوان رساله دکترای که مربوط به پدیده‌های احتراق در موتورهای موشکی بود ادامه داد. وی در میدان محصور و نظامی مخصوص آزمایشهای پرتاب در شهر کومرسدورف<sup>۳</sup> به کار خود ادامه داد و سکوهای پرتاب کاملترین موشک زمان جنگ، موشک معروف V2 در آنجا مستقر شدند.

موشکهایی که در کومرسدورف ساخته شدند سوختی از الکل و اکسیژن مایع داشتند و برای اینکه خنک شوند، محفظه احتراق آنها در ته مخزنی دو قسمتی گذاشته می‌شد؛ هر قسمت این مخزن محتوی یکی از دو جزء سوختی بود و یک بطری از نیتروژن متراکم هر کدام را تحت فشار قرار می‌داد. نخستین موشک این سری، A1، منفجر شد و سری دوم، A2، در دسامبر ۱۹۳۴ پرتاب شد. این سری تا A5 با موتورهای قویتر و با شکلهای کمی متفاوت ادامه یافت.

در این سری، موشک A4 که در سالهای ۱۹۴۰ - ۱۹۴۱ با موتور قویتری مجهز شده بود، همان موشک معروف V2، نخستین موشک زمین - زمین که در سپتامبر ۱۹۴۴ ارتش آلمان آن را به کار برد.

موشک V2، آغاز صفی طولانی: مأمور ساخت موتور V2 آقای والتر تیل<sup>۴</sup> بود که در بمباران سال ۱۹۳۴ در پینمونده<sup>۵</sup> کشته شد. موتور این موشک از نوع قبلی بود. مواد سوختی بوسیله دو تلمبه که یک توربین آنها را فعال می‌ساخت وارد محفظه احتراق می‌شدند و گازهای یک گازساز

1. Y. Winkler    2. Dessau

۳. Kummersdorf: محلی در پینمونده واقع در مشرق آلمان.

4. Thiel W.

۵. Peenemünde: بندری در مشرق آلمان در دهانه رودخانه پینه به دریای بالتیک.

کمکی که از پروکسید هیدروژن استفاده می‌کرد، توربین را می‌گردانید. سرعت پرتاب گازها در هر ثانیه ۲۱۳۵ متر بود و نیروی رانشی موتور در سطح دریا ۲۵۰۰ کیلوگرم. این موتور حدود ۷۰ ثانیه کار کرد. این موتور توانست با سرعت متوسط ۷۰۰ متر در ثانیه، یعنی دو برابر سرعت صوت، پرواز کند. اشتعال این موتور به روش پیروتکنیک، با چرخنده‌ای که در یک قاب سبک درون محفظه احتراق سوار شده بود، انجام می‌گرفت (شکل ۱۰۲).

نخستین آزمایش پرواز V2 در ۱۳ ژوئن سال ۱۹۴۲ بود. در سومین آزمایش که در ۳ اکتبر بود، و نخستین موفقیت این موشک به‌شمار می‌رود، موتور حدود یک دقیقه کار کرد. این کاملترین موتور موشکی بود که تا این زمان ساخته شده بود و پس از پایان جنگ، تکمیل‌های موتورهای موشک‌های آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق بر پایه آن انجام گرفت. موشک V2 در سپتامبر ۱۹۴۴ از نظر جنگی قابل استفاده بود.

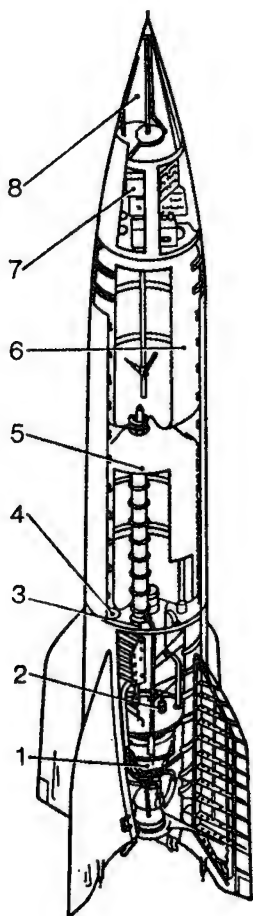
طرح‌های دیگری از موتورهای تقلیدی از V2 را گروه مستقر در پینونده برای موشک‌های سری A (از A6 تا A11) پیشنهاد کردند، اما ساخته نشدند. دو طرح آخری آنها A10 و A11 موشک‌هایی به‌ترتیب دو و سه مرحله‌ای بودند.

چند سال پیش از آن، آقای فون براون و گروه وی موتوری با سوخت الککل و اکسیژن مایع ساخته بودند که نیروی کششی آن ۱۰۰۰ کیلوگرم بود و با یاری آقای ارنست هاینکل در سال ۱۹۳۵ روی هواپیمایی He-112 نصب شد. نخستین پرواز این هواپیما در ۱۹۳۷ موفقیت‌آمیز بود. این موتور با واپس‌زنی ارگولها<sup>۱</sup> تغذیه می‌شد و مخازن آن را یک گاز تحت فشار قرار می‌داد. اما در آغاز سال ۱۹۳۹ تغذیه بوسیله تلمبه انجام گرفت. در پاییز آن سال، طرح هواپیماهای موشکی کنار نهاده شد. گروه پینونده موتورهایی با سوخت اکسیژن مایع و الککل رقیق ساخت. از این موتورها که نیروی رانشی آنها یک تن بود. برای از زمین برخاستن هواپیماهای بسب افکن He-111 و Ju-88 استفاده می‌شد.

شمار دیگری از موشک‌سازان آلمانی نیز در تکامل موشک‌های دارای سوخت مایع، سهم عمده‌ای داشتند، که از آن میان می‌توان از آقای یوگن زنگر<sup>۲</sup> اتریشی و هلموت والتر شیمیدان نام برد.

آقای یوگن زنگر در سال ۱۹۳۳ سیستم تازه‌ای از خنک‌سازی ابداع کرد که به سیستم «خنک‌سازی با بازیابی گرما» شهرت یافت و بعدها رایج‌ترین سیستم خنک‌سازی شد. در این سیستم، عامل خنک‌کننده، خود پروپروکلن است که در لفافی که دور محفظه احتراق و شیپوره را

۱. ergol، نوعی سوخت موشک-م.



شکل ۱۰۲. موشک V2.

۱. موتور موشک؛ ۲. انژکتورها؛ ۳. توربو پمپها؛ ۴. مخزن پروکسید هیدروژن؛ ۵. مخزن اکسیژن مایع؛ ۶. مخزن سوخت؛ ۷. مکانیسم کنترل؛ ۸. سر منفجر شونده.

گرفته است گردش می‌کند.

برتری این سیستم در این است که پروپرگول پس از اینکه گرم شد با دمای بالا وارد محفظه احتراق می‌شود بازده احتراق بالا می‌رود. وانگهی مخزن لازم برای ماده خنک‌کننده نیز حذف می‌شود.

آقای یوگن زنگر نوعی موتور موشکی ساخت که سوخت آن عبارت بود از روغن سنگین و اکسیژن گازی؛ و ۲۳ کیلوگرم نیروی رانشی ایجاد می‌کرد. این موتور مدت ۲۰ دقیقه کار کرد. او همچنین سوختهای به اصطلاح «فلزی» مانند گرد آلومینیم در حالت تعلیق در روغنهای سنگین و اوزون مایع را آزمایش کرده است.

یوگن زنگر در مدت جنگ کوشید تا برای برخاستن هواپیما از زمین موتورهای موشکی با سوخت مایع بسازد و از سال ۱۹۴۲ به بعد وقت خود را وقف بررسی پولسوراکتورها کرده است. موتور تک‌ساخت: در تک‌ساخت چنانکه از نامش فهمیده می‌شود انرژی واکنش از یک ماده یا مخلوطی از مواد محتوی سوخت و سوزا همراه یکدیگر، گرفته می‌شود.

نوعی موتور موشکی تک سوختی را هلموت والتر، شیمی‌دان آلمانی ساخته است. در این موتورها، انرژی بوسیله تجزیه گرمای پروپرگول، پروکسید هیدروژن (آب اکسیژنه) به دست می‌آید، کاتالیزورهایی مانند اسفنج پلاتین، خاکهای کمیاب، پرمنگنات این تجزیه را شدت می‌دهند. وانگهی سوختها، تنظیم‌پذیر هستند و به آسانی ساخته می‌شوند. گرچه بازده آنها زیاد بالا نیست و درصد مصرف آنها زیاد است (برای هر کیلوگرم نیروی رانشی موشک، ۳۵ کیلوگرم سوخت لازم است). فرآورده‌های تجزیه، گرمای کمی دارند و بنابراین می‌توان از آنها برای فعال کردن توربینهای گازی استفاده کرد.

آقای هلموت والتر، یک موتور موشکی را که سوخت آن پروکسید هیدروژن با غلظت ۸۰-۸۵٪ بود آزمایش کرد. موفقیت این موتور چنان بود که در سال ۱۹۳۵ برای ساخت آن کارگاه خاص برپا شد. در سال ۱۹۳۷ موشکی ساخته والتر با نیروی رانشی ۱۰۰ کیلوگرم برای برخاستن یک هواپیمای *Heinkel Kadette* از زمین به کار رفت و این نخستین خیزش هواپیما با کمک موشک در تاریخ هواپیمایی است.

موتور با سوخت آب اکسیژنه در زمان جنگ به عنوان موتور هواپیمای موشکی کاربرد زیادی داشت. موتوری با ۳۰۰ کیلوگرم نیروی رانشی در سال ۱۹۴۰ روی هواپیمای *DSF 194* (طرح دلتا سال ۱۹۳۲ آلکساندر لیبیش<sup>۱</sup>) گذاشته شد و این هواپیما با سرعت ۵۵۰ کیلومتر در ساعت



دست یافت. در سال ۱۹۴۱ هواپیمای مسرشمیت *Me-163A* جانشین آن شد و سرعت به ۱۰۳۰ کیلومتر در ساعت رسید و سرانجام تعداد زیادی هواپیمای مسرشمیت و یونکرس با این موتور مجهز شدند. موتورهای والتر برای پیش راندن موشکهای زمین- هوا (Hecht) یا هوا- زمین (H5) و اژدرها به کار گرفته شدند.

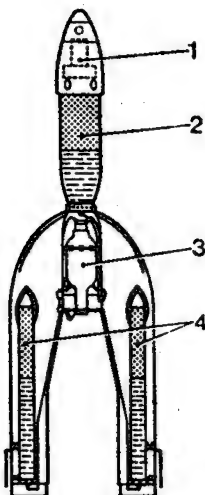
تحقیقات روی پروپروگولهای مایع: مؤسسات و شرکتهای دیگر آلمانی با انواع سوختهای مختلط آزمایشهایی کردند. آنها بویژه می‌کوشیدند تا سوزا، اکسیژن مایع، را با اسیدنیتریک عوض کنند. دشواری اساسی در کاربرد اکسیژن مایع، نقطه جوش آن ۱۸۲- درجه صدمبخشی بود که عایقکاری مخازن بزرگ را الزام آور می‌ساخت.

در سال ۱۹۳۸ کارخانه BMW موتوری با ۹۰٪ اسیدنیتریک و ۱۰٪ اسیدسولفوریک به عنوان سوزا و آمیزه‌ای از اتر، ایزوبوتیل وینیل و آنیلین، معروف به ویزول<sup>۱</sup>، به عنوان سوخت تولید کرد. در سالهای ۱۹۳۳ - ۱۹۳۴ این نوع موتور را بر موشکهای زمین- هوای شمترلینگ<sup>۲</sup> و واسرفل<sup>۳</sup> سوار کردند.

در ممالک متحده آمریکا، علاوه بر آزمایشهای گذارد، که به تنهایی کار می‌کرد، تحقیقات دیگری روی موتورهای موشکی به همت پژوهشگران و شرکتهای متعدد در چارچوب برنامه‌های گوناگون به عمل آمد. از آن جمله American Interplanetary Society (AIS) با سرپرستی آقای فرانکلین پیرس<sup>۴</sup> انواعی موتورهای موشکی طرح کرد. نخستین این موتورها که در سال ۱۹۳۲ ساخته شد تقلیدی از موشک آلمانی *Mirak* بود. این موتور که از آلومینیم ساخته شده و کمی بزرگتر از میراک بود، ۱۵ سانتیمتر طول و ۷/۵ سانتیمتر قطر داشت. این موتور با بنزین و اکسیژن مایعی که با فشار یک گاز خنثی به محفظه احتراق رانده می‌شد، کار می‌کرد. محفظه احتراق با آب خنک می‌شد. این موتور هم در کار استاتیکی و هم به شکل موشک، از عهده آزمایش بخوبی برآمد. تحقیقات پراکنده کوششهای بنیادی AIS در جهت ساخت سیستم خنک‌سازی متمرکز شده بود، حدود سال ۱۹۳۸، زمانی که جیمز ه. وایلد<sup>۵</sup> موتور معروف به «موتور لوله‌ای گرمساز خود خنک شده» را ساخت سیستم «بازیابی گرما» یا رژنراسیون مطرح شد. در سال ۱۹۳۳ آقای هری و. بول<sup>۶</sup> روی این سیستم آزمایشهایی- اما تنها برای گردنه شیپوره- انجام داده بود (شکل ۱۰۳).

سازمان دیگری Cleveland Rocket Society با سرپرستی آقای ارنست لویل<sup>۷</sup> دو موتور ساخت: یکی از آلیاژ نیکل کرومی فولاد که با آب خنک می‌شد؛ دیگری از آلیاژ سبک که با ارگولها

1. visol 2. Sehmetterling 3. Wasserfall 4. F. Pierce 5. J. H. Wyld 6. Harry Bull 7. E. Loebell



شکل ۱۰۳. موشک AIS. ۱. خرج مفید؛ ۲. مخزن سوخت؛ ۳. محفظه احتراق؛ ۴. مخزن سوزا.

(بنزین و اکسیژن مایع) خنک می‌شد.

در آستانه آغاز جنگ جهانی کوششهای متعددی بوسیله گروه‌های دیگری از کارشناسان، گروه هری و. بول، گروه نیش کارور، رابرت س. تراکس<sup>۲</sup> به عمل آمد. هسته اصلی این کوششها ایجاد امنیت کار محفظه احتراق بود و برای این کار مواد عایقی در نظر گرفته شد تا مرحله خنک‌سازی از بین برده شود و انواعی از پروپرگولها نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. امریکاییها نیز مانند آلمانیها برای تعویض اکسیژن مایع با سوزاها<sup>۱</sup> دیگر و دقیق‌تر بگویم با اسیدنیتریک همراه با آنیلین، کوشیدند. آقای استیف<sup>۳</sup> یکی از همکاران تراکس در سال ۱۹۴۲ این آمیزه را که پروپرگول هیپرگولیک نامیده شد، برای نخستین بار به کار گرفت.

در زمان جنگ در ممالک متحده امریکا، کوششهای عمده در جهت ساخت موتورهای موشکی جهت برخاستن هواپیماها از زمین و شتابانیدن آنها بود. آقای گدارد در ساخت موتوری با سوخت بنزین و اکسیژن مایع کمک کرد. نخستین آزمایشهای پروازی در آوریل ۱۹۴۲ انجام گرفت.

مؤسسه Reaction Motors Society که آمریکن راکت سوسایتی آن را در سال ۱۹۴۱ احداث کرده بود نیز چند موتور موشکی برای خیزش هواپیماها با سوخت بنزین و اکسیژن مایع

ساخت که نیروی رانشی آنها به ۱۳۰۰ کیلوگرم و مدت کار آنها به ۶۰ ثانیه رسید. در سال ۱۹۴۳ این موتورها در آزمایشها موفق بودند.

در اتحاد شوروی سابق، کار تسیولکوفسکی به جریان آزمایشها حرکتی داد. در سال ۱۹۲۴ برای بررسی مشکلات موشکها یک دبیرخانه و برای بررسی پروازهای کیهانی اداره‌ای تأسیس شد. دو پژوهشگر روسی با نامهای فریدریک آرتوروویچ تساندر<sup>۱</sup>، نخست با بنزین و هوا، سپس بنزین و اکسیژن مایع و آقای پتروویچ گلوکو<sup>۲</sup> با تولوئن و تتروکسیدنیتروژن، سپس با نفت سفید و اسیدنیتریک انواع زیادی موتورهاى موشکی را آزمایش کردند. در اینجا هم مشکلاتی که باید برطرف می‌شدند اصولاً عبارت بودند از خنک‌سازی موتور و افزایش نیروی رانشی آن.

موتورهای آقای گلوکو برای پرتاب موشکهای زمین-هوا، با نیروی رانشی ۱۵۰ کیلوگرم، یک بمب پرنده و یک موشک ویژه هواپیما با نیروی رانشی، ۱۷۵ کیلوگرم بودند. در سال ۱۹۳۷ گلوکو موتورهایی با سوخت نفت سفید و ترانیترومتان ساخت که به ترتیب ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم نیروی کششی آنها بود.

مخفیکاری ویژه زمان جنگ در مورد موتورهای موشکی، در شوروی هنوز به قوت خود باقی است و حتی اطلاعات مربوط به گذشته نسبتاً دور هم انتشار نمی‌یابند.

تحقیقات فرانسه به‌طور نامنظم بدون اینکه به ساختهای مشخصی منجر شوند ادامه داشت. در زمان اشغال فرانسه بوسیله ارتش آلمان، آقای باره<sup>۳</sup> موتوری با سوخت اتر نفتی و اکسیژن مایع را تحقیق می‌کرد. آزمایش کار استاتیکی این موتور در نوامبر ۱۹۴۱ در نزدیکی لیون به‌عمل آمد. قدرت این موتور را می‌شد با کم و زیاد کردن مقدار پروپرگول مصرفی تنظیم کرد. این موتور را سوخت آن خنک می‌کرد و با وارد آوردن فشار روی مخزنها به توسط نیتروژن، تغذیه می‌شد.

تحقیقاتی هم قبل از جنگ جهانی دوم یا در طی آن در دیگر کشورها انجام گرفته است. کهن‌ترین آنها، تحقیقات کلی مؤسسه کروکو<sup>۴</sup> در ایتالیا بود که از سال ۱۹۲۷ آغاز گشت و در سال ۱۹۳۵ به علت فقدان بودجه پایان گرفت. آقای آیزک لاجک<sup>۵</sup> در بریتانیای کبیر در سال ۱۹۴۲ توانست موتوری با سوخت بنزین و اکسیژن مایع را پرواز دهد. ژاپونها هم در زمان جنگ موتورهایی از نوع تک سوخت با پروکسید هیدروژن ساختند که مدت ۷۵ ثانیه نیروی رانشی آن ۲۰۰ کیلوگرم ۱. فریدریک آرتوروویچ تساندر، ۱۸۸۷-۱۹۳۳ متولد ریگا یکی از آتشفشانهای پشت ماه به نام وی نامگذاری شده است.

۲. والتین پتروویچ گلوکو (۱۹۰۸- ) به‌مناسبت کارهایش سه بار نشان لنین، یک بار نشان انقلاب اکتبر، یک بار نشان پرچم سرخ کار و چندین مدال گرفته است.

بود. از این نوع موتورهای هم در موشکها و هم در هواپیماهای ویژه خودکشی (کامیکازه) استفاده کردند.

نتایج گرفته شده: این چند نمونه نشان می‌دهند که محققان پراکنده همگی در یک زمان به همان نتایجی رسیدند که چندین سال پیش از آن در کشوری نظیر آلمان به دست آمده بودند. این امر جنبه پراکنده و حتی گهگاهی تحقیقاتی را تأیید می‌کند که بدایلی که گفته شد همچون تقریباً دیگر زمینه‌های آفرینش تکنیک، نشر بین‌المللی نداشته است.

بالین حال، باید به یاد آوریم که در برهه یک چهارم سده که فاصله آغاز کارهای گذارد و پایان جنگ جهانی دوم را بر می‌کشد، انواع اصلی موتورهای موشکی با سوخت مایع و اصول کلی ساخت آنها، اختراع و به کار رفته‌اند. این را هم باید بگوییم که این آفرینش، نتیجه یک رشته کارهای تجربی است همچنانکه اختراع انواع دیگر موتورهای درونسوز نیز چنین بوده است.

خصلت تجربی این رفتار، بویژه در زمینه پروپرگولها به چشم می‌خورد که ویژگیهای شیمیایی و فیزیکی آنها را باید در محدوده‌ای نسبتاً تنگ در نظر داشت. هنوز هم دامنه گوناگونی پروپرگولها کاملاً گسترده است و این وضع بخوبی نشان می‌دهد که قاعده کمترین زیان، چه در مورد به کارگیری فراورده‌ها و رهبری واکنش در محفظه به اصطلاح احتراق و چه در زمینه بازده، با قدرت حکم فرماست. درباره بالا بردن بازده، باید گفت که پژوهشهای بسیار دقیقی برای تعیین شکل و اندازه محفظه و شیوره و نوع موادی که در ساخت این موتورها به کار گرفته می‌شوند انجام گرفته‌اند.

دشواریهای دیگر کار نیز در این دوران برطرف شده‌اند. گرچه این دشواریها مربوط به سیستمهای کمکی موتورهای موشکی است، برای کار آن اساسی می‌باشند: مکانیزم تزریق، تغذیه، خنک‌سازی و بالاخره اشتعال. مثلاً برای تغذیه، هر دو روش اصلاح شده ابتکاری آقای گذارد به کار گرفته شدند: رانش به کمک ذخیره گازهای بی‌اثری که فشرده شده‌اند، یا جریان دادن بوسیله توربوپمپها یا تلمبه‌های توربینی.

### موشکهای ماهواره‌بر

تاریخ موتورهای موشکی از زمان جنگ جهانی دوم، اصولاً در آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق و ... و در مقیاس کمتری در اروپای غربی به بخشهای موشکها، ماهواره‌ها، موشکهای هواشناسی و هواپیماها محدود می‌شود.

آغاز کار با درگیری جنگ، در آلمان با موشکهای V2 بود و طرحهای عملی ناشده‌ای از نوع

A6 تا A11 تهیه شدند. همه اصول ساختمانی از محفظه احتراق گرفته تا سیستمهای کمکی، پیش از این تاریخ شناخته شده بودند.

پیشرفتهای پس از جنگ موشکها، اساساً در چند نکته خلاصه می‌شوند. موتورهای با توان روزافزون و طول کاری فزاینده، در پرتو کاربرد مصالح تازه ساخت و بررسی اشکال و ابعاد محفظه احتراق و سرانجام کاربرد موشکهای جدید چند مرحله‌ای.

پروپروگولهای جدید بویژه برای حذف اکسیژن مایع، که نمی‌شد آن را انبار کرد، پذیرفته شدند، و به مرحله‌ای رسیدند که توانستند طبق دلخواه خود، مقدار نیروی رانشی موتورهای موشکی را با تغییر مقادیر سوخت با وسایل معمولی کم و زیاد کنند.

امکان روشن و خاموش کردن مکرر موتور در فضاهاى بالای جو، که برای اجرای برنامه‌های فضایی لازم بود نیز به دست آمد.

در ممالک متحدۀ امریکا، در دوران پس از جنگ، رقابت میان نیروهای زمینی، دریایی و هوایی، انگیزۀ تحقیقاتی بود که به‌طور کاملاً جداگانه و گاهی موازی با یکدیگر در سه سازمان انجام می‌گرفت.

ترقی موشکهای امریکایی: در محدوده برنامهٔ هرمس نیروی زمینی، که شامل ساخت موشکهای غول‌پیکر بود، پس از چند آزمایش با موشکهای V2 مصادره شده، نخستین موشک چند مرحله‌ای با نام *Bumper* ساخته شد؛ این موشک در واقع همان V2 بود که با موشک کوچکی با نام *Wac-Corporal* با سوخت مایع مجهز شده بود. بعداً نمونه‌های جدیدی از موتورها آزمایش شدند. یک موتور موشکی که باز از V2 الهام گرفته شده بود سوختی از الکل و اکسیژن مایع داشت. نیروی رانشی این موشک ۶۱۰۰ کیلوگرم پیش‌بینی شده بود و در سالهای ۱۹۴۸ - ۱۹۴۹ بوسیلهٔ جنرال الکتریک برای موشک هرمس A1 برای کارهای استاتیک آزمایش شد. بعداً، در سال ۱۹۲۵ که برنامه هرمس متوقف و برنامهٔ Redstone به اجرا گذارده شد، نوع اصلاح‌شدهٔ آن ۸ تا ۱۰ تن نیروی رانشی داشت.

موتورهای دیگری هم که از V2 الهام گرفته شده بودند جهت موشکهای فضایی ساخته شدند. در اکتبر سال ۱۹۴۸ مؤسسه Reaction Motor Incorporated توانست موتوری با سوخت اکسیژن مایع و الکل، به تقلید از V2 بسازد. این موتور جهت موشک فضایی وایکینگ بود که طی ۶۶ ثانیه ۹۵۰۰ کیلوگرم نیروی رانشی ایجاد می‌کرد. در ماه مه ۱۹۴۹ موشک وایکینگ ۱ به فضا پرتاب شد و به ارتفاع ۸۰ کیلومتری رسید. بعداً این موتورها تکمیل شدند و انواع متعددی وایکینگ

تا وایکینگ ۱۴ تا ماه مه ۱۹۵۷ پرتاب شدند. موشک وایکینگ بزرگترین موشک هواشناسی بود که در آمریکا ساخته شده بود. موشکهای هواشناسی دیگری با پروپروگول مایع به گروه *Aerobee* تعلق داشتند.

یکی از مهمترین موتورهای ساخته شده پس از جنگ، موتوری بود که شرکت راکت دین<sup>۱</sup> برای نیروی هوایی در چارچوب برنامه Navaho ساخت. این موتور ۶۰ تن نیروی رانشی ایجاد کرد، سوخت آن اکسیژن مایع و الکل اتیلیک بود. در جریان این برنامه یک موشک ۱۳۵ تنی ساخته شد که پس از اینکه به یاری سه موتور موشکی با نیروی رانشی ۶۰ تن از زمین برخاست بوسیله یک استاتوراکتور پرواز کرد. این موتور بعداً جهت ساختن موشک Redstone به کار گرفته شد و پس از آن در ردیف موتورهای تکمیل شده موشکهای *thor*، *Jupiter* و *Atlas* همچنین موشک ماهواره‌بر *Saturn* گذاشته شد.

موشکهای جوپیتز نخستین موشکهای بالیستیک با برد متوسط ساخت آمریکا بودند. تغییراتی در این موتور داده شد تا با سوخت نوین ارگول، هایدین (Hydyn)، آمیزه‌ای از دی‌متیل‌هیدرازین نامتقارن و دی‌اتیلن‌تری‌آمین تطبیق کند و نیروی رانشی آن افزایش یابد.

باز باید گفت، به رداستون، دو مرحله اضافه شد. مرحله دوم شامل ردیفی از یازده موشک و مرحله سوم دارای سه موشک بود که همگی سوخت جامد داشتند. آزمایشهای اولیه در سپتامبر ۱۹۵۶ انجام گرفت.

نیروی هوایی آمریکا کوششهای خود را در سال ۱۹۵۴ روی برنامه اتلس متمرکز ساخت، اما در سال ۱۹۷۵ به برنامه Navaho پیوست. موشک اتلس نخستین موشک بالیستیک قاره‌پیمای ممالک متحده آمریکا بود که سه موتور آن را پیش می‌برد که یک موتور اصلی در مرکز و دو موتور شتاب‌دهنده با اکسیژن مایع و نفت سفید کار می‌کردند. ساخت این موشک اول ژوئن سال ۱۹۵۵ تا اوت ۱۹۶۱ طول کشید.

موتورهای اتلس E که آخرین این موتورها بودند در موتورهای شتاب‌دهنده، نیروی رانشی برابر ۱۵۰ تن و در موتور مرکزی ۲۶ تن ایجاد می‌کردند. موشکهای اتلس امکان اشتعال در ارتفاع زیاد موتورهای موشکی را به وجود آوردند. با ساخت موتور اتلس، روش تازه‌ای در موشک‌سازی پایه‌گذاری شد: ساخت همزمان؛ منظور از همزمانی، ساخت و آزمایش هم‌زمان انواع گوناگونی از یک جزء موشک است. هزینه این کار، گرچه زیاد بود در زمان صرفه‌جویی می‌شد.

همراه با ساخت موشکهای اتلس، موشکی با برد متوسط در سال ۱۹۵۷ ساخته شد، موشک

تایتن ۱ که در ژانویه ۱۹۵۹ ساخت آن به پایان رسید. این موشکی دو مرحله‌ای بود که مرحله دوم آن، در ارتفاعات زیاد، پس از خاموش شدن اولی، روشن می‌شد. موشک تایتن 1 مانند موشکهای اتلس و ثور به عنوان سوزا از اکسیژن مایع استفاده می‌کرد و بنابراین انبار کردن آنها میسر نبود.

ساخت موشک تایتن 11 در مارس ۱۹۶۲ به پایان رسید، نخستین مرحله این موشک، رانشی برابر ۱۹۵ تن داشت و مرحله دوم، ۴۵ تن. موتورهای این موشک برای استفاده از سوخت ارگولهای انبارکردنی: دی‌متیل‌هیدرازین و هیدرازین به عنوان ماده سوزا، پروکسید نیتروژن اصلاح شده بودند. موشکهای ماهواره‌بر: جالبترین جنبه موتورهای موشکی با سوخت مایع، از نظر توده مردم، کاربرد آنها به عنوان موشکهای ماهواره‌بر بود.

نخستین موشک ماهواره‌بر امریکا، موشک Vanguard بود که سه مرحله داشت. موتور این موشک از روی مدل موشکهای وایکینگ و آئروبی ساخته شده بود. مؤسسه جنرال الکتریک، موتور مرحله نخست را با سوخت اکسیژن مایع و نفت سفید ساخته بود و نیروی رانشی آن به ۱۲ تن می‌رسید. نیروی رانشی موتور مرحله دوم را که آفروجت جنرال ساخت ۳۴۰۰ کیلوگرم بود. سوخت این موتور اسیدنیتریک و دی‌متیل‌هیدرازین بود. موتور مرحله سوم را شرکت گراندسنترال راکت ساخت، با سوخت جامد کار می‌کرد و رانش آن ۱۳۰۰ کیلوگرم بود. نخستین پرتاب از کیپ کاناورال در اکتبر ۱۹۵۷ انجام گرفت. ساخت این موشک در سال ۱۹۵۹ متوقف شد. موشک ماهواره‌بر دیگری به نام Juno 1 به جای آن برگزیده شد که در واقع همان جوپیتر C با یک مرحله اضافی بود. این موشک نخستین ماهواره امریکا را در ژانویه سال ۱۹۵۸ در مدار زمین قرار داد.

در سال ۱۹۵۸ نسل جدیدی از موشکهای ماهواره‌بر ساخته شدند. این نوع موشکها بمنظور کاربرد آنها در مرحله اول موشکهای دارای برد متوسط جوپیتر و ثور، با یک مرحله افزوده در بالا (Thor Agena, Thor Epsilon, Thor Delta, Thor Able, Juno 11) ساخته شدند. در ماه ژوئیه ۱۹۵۸ مؤسسه ناسا<sup>۱</sup> بمنظور جبران واپس ماندگی ممالک متحده امریکا در مسابقه با اتحاد جماهیر شوروی سابق برای تسخیر فضا تشکیل شد.

در سال ۱۹۵۸ موشکهای ماهواره‌بر با استفاده از موشکهای قاره‌پیمای اتلس و تایتن به میدان آمدند. موشک دو مرحله‌ای Atlas Centaur (موشک اتلس دارای یک مرحله بالایی سنتور) نخستین موشک ماهواره‌بری بود که از موتوری با سوخت اکسیژن و هیدروژن مایع استفاده کرد. این سوخت بسیار قوی را تسلیوکوفسکی و گدارد برای مرحله دوم خود در نظر گرفته بودند.

براساس موشک تایتن 11، موشک ماهواره‌بر تایتن 11، عین موشک نخستین و تایتن 111

۱. National Aeronautics & Space Administration، به معنای اداره فضایی و فضایی ملی-م.

ساخته شد. موشک اخیر متشکل بود از یک ماهواره‌بر تایتن 11 و دو موشک توأم با سوخت جامد و نیروی رانشی بیش از ۱۰۰۰ تن که در دو جانب موشک مرکزی قرار داشتند.

پراوازه‌ترین موشکهای فضایی امریکایی، سری ساترن هستند. ساترن ۱ دو مرحله‌ای بود. مرحله نخست آن را هشت موتور جویتر به پیش می‌راند. این موتورها گرد هشت مخزن از نوع رداستون قرار داشتند؛ این مخازن نیز بنوبه خود اطراف مخزن جویتر را گرفته بودند. موتورهای جویتر اصلاح شده و دارای سوخت اکسیژن مایع و نفت سفید بودند، نیروی رانشی آنها به ۸۵ تن می‌رسید. مرحله دوم مجهز به شش موتور، هر یک با نیروی رانشی ۶۸۰۰ کیلوگرم بودند و از سوخت اکسیژن و هیدروژن مایع استفاده می‌کردند. موتورهای مرحله اول را شرکت راکت دین ساخته بود و موتورهای مرحله دوم را پرات و ویتنی<sup>۱</sup>. این موشک در کار استاتیک از آزمایشهایی در هانتسویل<sup>۲</sup> سربلند بیرون آمد، سپس نخستین پرتاب آن در ۲۷ اکتبر ۱۹۶۱ در کیپ‌کندی انجام گرفت.

موشک دیگری از سری ساترن با نام *Saturn 1B* بعداً ساخته شد و نخستین پرتاب آن در ۲۶ فوریه ۱۹۶۶ در کیپ‌کندی انجام گرفت. موتورهای این نوع موشک با ساترن ۱ تفاوت داشتند. مرحله اول قدرت هشت موتور خود را داشت که هر یک ۹۳ تن نیروی رانشی داشتند و شش موتور پرات و ویتنی با یک موتور با رانش ۹۰ تن تعویض شده بودند؛ موتور اخیر ساخته راکت دین و سوخت آن اکسیژن و هیدروژن مایع بود.

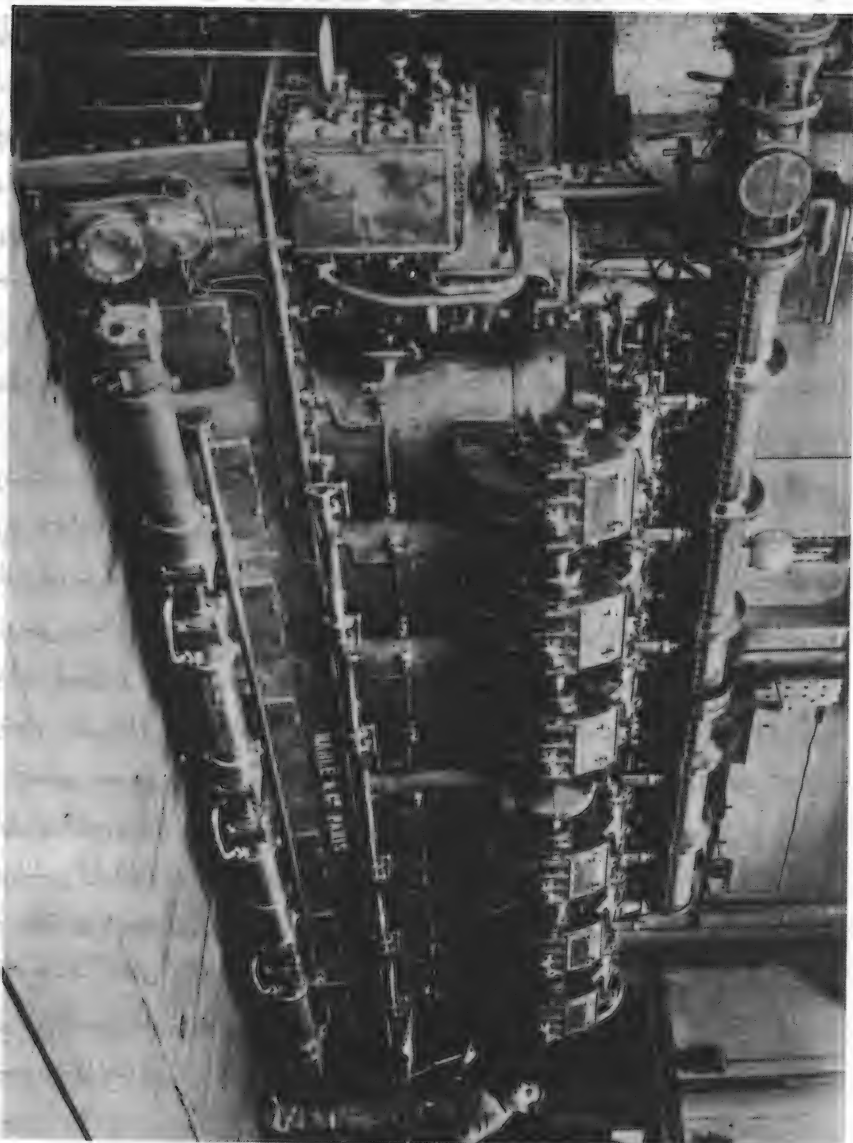
موشک ساترن 1B را می‌توان درآمدی بر موشک ساترن V دانست، موشکی در ۲۰ ژوئیه ۱۹۶۹ نخستین انسانها را به کره ماه برد. موشک ساترن V دارای سه مرحله بود (شکل ۱۰۴). مرحله اول آن با پنج موتور F-1 تجهیز شده بود. هر موتور F-1 اکسیژن مایع و نفت سفید می‌سوزاند و نیروی رانشی آن ۸۸۰ تن بود و بدین ترتیب مرحله اول ۴۴۰۰ تن نیروی رانشی داشت. هر پنج موتور به مدت دو دقیقه و نیم در هر ثانیه ۱۵ تن پروپرگول سوزانیدند. این موتورها بوسیله بوئینگ<sup>۳</sup> در کارخانه میشد<sup>۴</sup> متعلق به ناسا ساخته شدند. مرحله دوم آن پنج موتور J-2 با سوخت اکسیژن و هیدروژن مایع داشت، که نیروی رانشی هر موتور ۹۰ تن بود. آنها شش دقیقه و چهل ثانیه کار کردند. مرحله سوم را تنها یک موشک J-2 به پیش راند. نخستین پرتاب این موشک غول‌آسا در ۹ نوامبر ۱۹۶۷ بود.

1. Pratt & Whitney

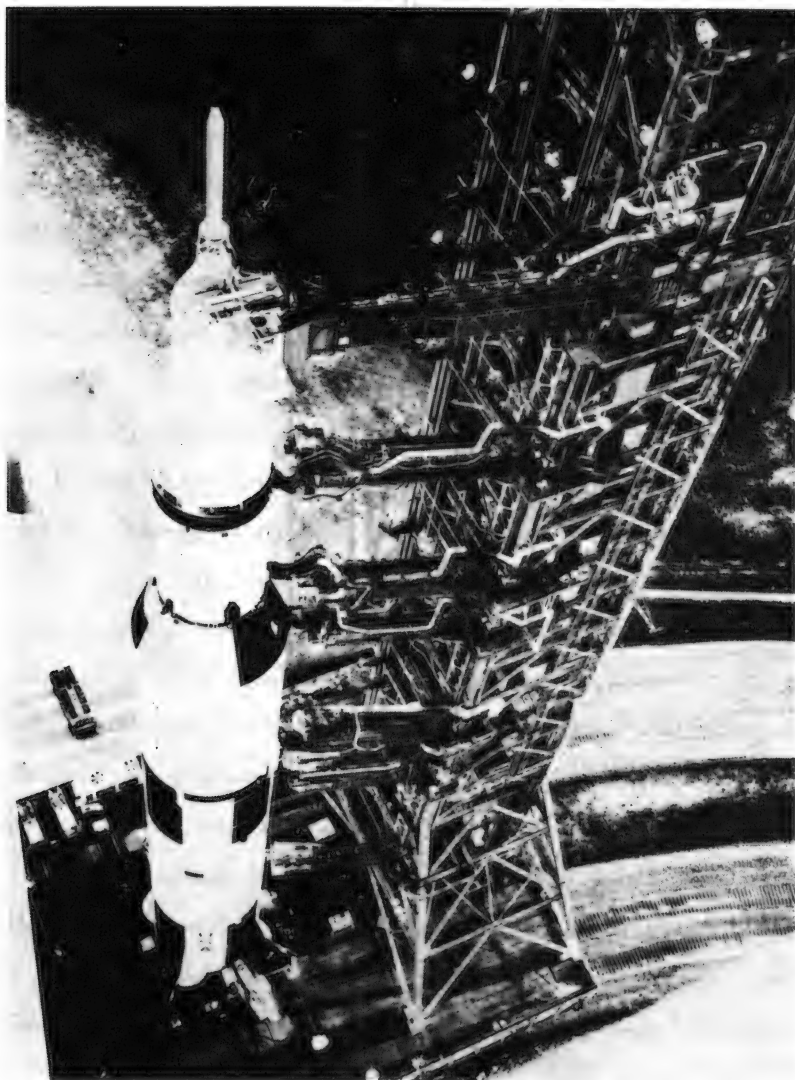
۲. Huntsville: شهری در شمال آلاباما، واقع در جنوب‌شرقی ممالک متحده امریکا-م.

3. Boeing 4. Michoud

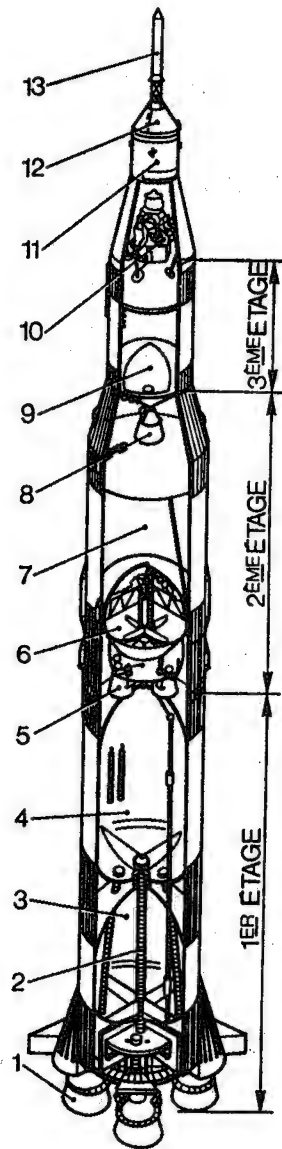




تابوی ۱۱. موتور صنعتی دیزل (حدود ۱۹۱۰).



تابلوی ۱۲. آپولوی XVII که یک موشک ساترن V آن را حمل کرده است (۱۹۷۲).



شکل ۱۰۴. موشک ساترن V.

۱. موتور F-1؛ ۲. لوله‌های اکسیژن؛ ۳. مخزن کروژن؛ ۴. مخزن اکسیژن مایع؛ ۵. موتور J-2؛ ۶. مخزن اکسیژن؛ ۷. مخزن هیدروژن؛ ۸. موتور J-2؛ ۹. مخزن اکسیژن؛ ۱۰. مدول ماه‌نشین؛ ۱۱. مدول خدمات؛ ۱۲. مدول فرمان؛ ۱۳. سیستم هدایت.

بیخبری از پژوهشهای شوروی: علاوه بر ممالک متحده آمریکا، اتحاد جماهیر شوروی سابق نیز تعدادی موشک ساخته و پرتاب کرده است، اما ساختمان آنها هنوز سرّی مانده است و تنها با حدس و گمان در این باره می‌توان سخن راند.

شورویها هم مانند امریکاییها از تجربیات آلمانیها از V2 و دیگر طرحها استفاده کردند. اما شورویها بسیار زود توانستند موتور موشکی بسیار قدرتمند خود را بسازند. آنان بمنظور جبران عقب‌ماندگی خود در رشته سلاحهای اتمی و انتقال بارهای سنگین اتمی خود که به‌طور بدی راه‌اندازی شده بودند، ناچار از پیش بردن موشکهای خود با قدرت هرچه بیشتر بودند. چنین می‌نماید که نخستین موشک با برد متوسط شورویها در سال ۱۹۵۶، یعنی یک سال پیش از پرتاب موشکهای جویپتر و ثور پرتاب شد.

نخستین موشک قاره‌پیمای شورویها در سال ۱۹۵۷، بیش از یک سال زودتر از پرتاب موشک اتلس بود. اتحاد شوروی در چهارم اکتبر توانست نخستین ماهواره خود را، احتمالاً با موشکی که از موشکهای قاره‌پیما به وام گرفته شده بود، در مدار زمین قرار دهد. این موشک پرآوازه با سوخت مایع Scrag نامیده می‌شد که سه مرحله‌ای با برد ۱۰۰۰۰ کیلومتر بود.

برای نخستین بار یک موشک ماهواره‌بر شوروی در سال ۱۹۶۷ در نمایشگاه هوا-فضایی در شهر لوبورزه<sup>۱</sup> به نمایش گذاشته شد. این همان موشک واستوک بود که پنج گروه پیشران آن را حرکت می‌دادند، که هر گروه از چهار موتور موشکی با سوخت نفت سفید و اکسیژن مایع تشکیل شده بودند. پس از موشک واستوک موشکهای بسیار نیرومندتر واسخود و سایوز ساخته شدند.

ساخت چنین موشکهایی هنوز در تیول دو ابرقدرت مانده است. تعدادی کمی از کشورهای دیگر، تا آنجا که ما می‌دانیم، خود را گرفتار چنین کارهای عظیمی کرده‌اند.

بریتانیای کبیر برای موشکهای بزرگ خود موتورهای ساخته است. سوخت این موتورها اکسیژن مایع و نفت سفید، و نیروی رانشی آنها ۳۸ تن است. این موشک را شرکت رولز-رویس ساخته و اجازه ساخت آن را جهت موشک با برد متوسط *Blue Streak* از راکت دین دریافت داشته بود.

فرانسه نیز چند موتور موشکی با سوخت مایع جهت هواشناسی به‌نامهای *Véronique* (با سوخت اسیدنیتریک و گازوئیل) و *Vesta* با بردهای به‌ترتیب ۲۶۰ و ۴۰۰ کیلومتر، و نیز موشک ماهواره‌بر *Diamant* را که در سال ۱۹۶۵ توانست ماهواره کوچکی را در مدار زمین قرار دهد، ساخته است. مرحله اول این موشک، موتوری با سوخت اسیدنیتریک و ترباتین بود که ۱۳ تن نیروی رانشی داشت. دو مرحله بعدی آن با سوخت جامد و دارای نیروی رانشی ۸ و ۳ تن بودند.

۱. Le Bourget شهری در فاصله یازده کیلومتری شمال‌شرقی پاریس-م.

هواپیماهای موشکی: پس از جنگ جهانی دوم و به یاری معلوماتی که از تحقیقات آلمانها به دست آمده بود، موتورهای موشکی در هواپیماها نیز به کار گرفته شدند. در ممالک متحده امریکا از سال ۱۹۴۴ تحقیقاتی در این باره آغاز شد. این تحقیقات روی *MX-324* که نوع پیشرفته *MX-653* بود سرانجام به ساخت هواپیمای موشکی *XS-1* منجر شد.

موتور طرح *Bell-X-1* را شرکت *Reaction Motors* ساخت. این نوعی موتور با سوخت مایع دارای چهار شیبوره بود با نیروی رانشی ۲۷۰۰ کیلوگرم. نوع دارای چهار شیبوره جداگانه به خلبان اجازه می داد که با راه انداختن یا متوقف ساختن جداگانه آنها، مقدار نیروی رانشی را با مراحل ۶۸۰ کیلوگرمی، در زمانی که سوپایهایی تنظیم مقدار رانش هنوز وجود نداشت، تغییر دهد. این آزمایشها در سال ۱۹۴۷ شروع شدند و در ۱۴ اکتبر آقای چارلز ایگر<sup>۱</sup>، خلبان برای نخستین بار با سرعتی بیشتر از صوت پرواز کرد. در سال ۱۹۴۹ سرعت ۱۵۶۱ کیلومتر در ساعت دست یافتند. انواع تکمیل شده این وسیله ساخته شدند. در سال ۱۹۵۳ هواپیمای *Bell-X-1A* با سرعتی برابر ۲۶۳۰ کیلومتر در ساعت پرواز کرد.

موتور جدید کورتیس - رایت<sup>۲</sup> این بار با نیروی رانشی تنظیم شونده ۶۸۰۰ کیلوگرم ساخته شد و روی هواپیما *Bell-X-2* نصب و در ۱۹۵۵ با پرواز آزمایش شد. اما در همین سال شرکت *North American Aviation* ساخت هواپیمای موشکی *X-15* را شروع کرد. موتور این هواپیما را راکشن موتور ساخته بود که با سوخت جامد و نیروی رانشی تنظیم شونده ۲۶۰۰۰ کیلوگرم کار می کرد. نخستین پرواز این هواپیما در ۱۹۶۱ بود و در ۱۹۶۲ به سرعتی برابر ۶۶۰۵ کیلومتر (۶ ماخ) در ارتفاع ۱۰۸ کیلومتری دست یافت.

## انرژی هسته‌ای

### مراحل نخستین

دگرگونی‌هایی که در رشته انرژی هسته‌ای، از آغاز به بعد، پدید آمدند سیمایی ویژه دارند. فهم این پدیده بنیادی شکستن هسته اورانیم به دوپاره نسبتاً سنگین، به کمک یک نوترون بسیار دشوار است زیرا عادت شده است که واکنشهای هسته‌ای، از آن هسته‌های سبک باشند، چه برای پرتابها و چه برای فراورده‌ها، حتی زمانی که آماجها، هسته‌های سنگین هستند. این واکنشها پایه‌ای این چنین دارند:  $(n, n)$ ؛  $(n, 2n)$ ؛  $(n, \gamma)$ ؛  $(n, p)$ ؛  $(n, \alpha)$ ؛  $(p, n)$ ؛  $(d, n)$ ؛  $(d, p)$ . بدین ترتیب سرگردانی مدت چند سال برقرار بود تا اینکه آقایان هان<sup>۱</sup> شتراسمان<sup>۲</sup> در سال ۱۹۳۸ نظر درست را بیان کردند. این نظر نتایج زیر را دربر داشت:

شکافت هسته‌ای می‌بایست انرژی هنگفتی آزاد کند، زیرا مقدار انرژی اتصال در هسته‌ها در

۱. Hahn اوتو (۱۸۷۹ - ۱۹۶۸): شیمیدان آلمانی، در سال ۱۹۴۴ جایزه نوبل را در شیمی برای کارهایش در زمینه

شکافت اتمی دریافت کرد. - م.

۲. Strassmann فریس (۱۹۰۲ - ) : شیمیدان آلمانی، که همراه با اوتوهان موفق به دریافت جایزه انریکو فرمی

در سال ۱۹۶۶ بخاطر کارهایش در زمینه شکافت اتمی شد. - م.

رَدیف MeV برای هر ذره است درحالی‌که در اتصالات فیزیکی شیمیایی در ردیف eV می‌باشد؛ و نیز می‌بایست نوترونهایی آزاد شوند، زیرا شمار میانگین نوترون‌ها نسبت به پروتون در هسته‌ها ثابت یا حتی رادیوآکتیو با عمر کوتاه)، همراه با عدد اتمی افزایش می‌یابد؛ چنانچه این نوترون‌ها فراوان باشند نوعی واکنش زنجیری پدید خواهد آمد که امکان می‌دهد به جهان ماکروسکوپی گذار کند. یعنی با جرم کمی از ماده مقدار هنگفتی انرژی به دست آید. جملگی این نتایج در آزمایشگاه‌های کوچک، پس از زمان کوتاهی، اساساً و قطعاً، به‌طور کلی تأیید شدند.

نخستین دههٔ عصری نوین: گذار مؤثر به جهان ماکروسکوپی بسیار دشوار بود. حتی از جنبهٔ بسیار کلی آن، مستلزم به‌کارگیری ده‌ها تن مواد جدید نظیر اورانیم فلزی، یا آب سنگینی، یا مواد معمولی نظیر گرافیت، با خلوصی که تا آن زمان سابقه نداشت، بود. آزمایش این کار به برپا شدن قبلی صنایع پراهمیتی بستگی داشت.

این گذار از آزمایشگاه به عمل که از یکسو دورنما و ترس کاربردهای جنگی آن را ترغیب می‌کرد و از سوی دیگر مضیقه‌های جنگ مانع انجام آن بود، در آلمان با شکست مواجه شد اما در ممالک متحدهٔ امریکا به موفقیت انجامید. کوشش فرانسه، که در همان حالت جنینی با شکست سال ۱۹۴۰ ناپود شد در انگلستان ادامه یافت. اما این کشور نیز که نقش بزرگ را به امریکا واگذارده بود، کوشش خود را به همکاری با آن محدود کرد و تنها با کانادا بکارهای تا حدودی درجهٔ دوم خشنود شد. نه کشور ژاپن و نه اتحاد جماهیر شوروی سابق، در زمان جنگ در زمینهٔ برنامه‌های بزرگ هسته‌ای کار مهمی نکردند با اینکه برخی حقایق روشن مربوط به شکافت هسته‌ای در سال ۱۹۳۹ در شوروی کشف شده بودند.

به سال ۱۹۳۵ بود که انریکو فرمی در رم برای ایجاد واکنش نوترون‌ها با اورانیم به نخستین آزمایش خود دست زد. نتایج پیچیدهٔ این کار تنها در پایان سال ۱۹۳۸ بوسیلهٔ هان و شتراسمان روشن شدند و نخستین واکنش زنجیری شکافت در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ در شیکاگو، از نو به رهبری فرمی تحقق یافت.

اما هنوز با ماشین بدون موتوری سروکار داشتند. برای ایجاد انفجارهای هسته‌ای، ممالک متحدهٔ امریکا، لااقل طی سه سال کارخانه‌های متعددی ساخت که اکثر جنبه‌های آنها کاملاً تازه بود: رآکتورهای هسته‌ای؛ تأسیسات ویژه آماده‌سازی شیمیایی سوخته‌های هسته‌ای برای استخراج پلوتونیم از آنها، یک عنصر مصنوعی که تا پایان سال ۱۹۴۰ ناشناخته بود؛ واحدهای جدا

کردن ایزوتوپها بر پایه اورانیم ۲۳۵ (یا آب سنگین). بدون اینکه از همه تأسیسات لازم در مراحل پیش از رآکتور: تهیه مواد اولیه و اجزای متشکله، و مراحل پس از آن: کاربر فراورده‌ها، سخن گفته باشیم. همه اینها غالباً انگیزه مجموعه‌های واقعی اختراعات و عملی کردن آنها شد، کاری که با وجود شرکت ده‌ها هزار نفر و صدها مؤسسه و کارخانه در آن، پنهانی انجام می‌گرفت و با ویران کردن هیروشیما و بعد، ناگازاکی در ماه اوت ۱۹۴۵ فاش گردید، درحالی‌که هیچ مبادله علمی و فنی، به معنای مصطلح، را پایه‌گذاری نکرد.

این کار، رویهم‌رفته دو میلیارد دلار هزینه داشت (سی سال پس از آن،<sup>۱</sup> این مبلغ، عظمت پیشین را ندارد و ما تورم پیوسته قیمت‌ها را باید به حساب آوریم). همکاری دانشمندان با مهندسان هیچ‌گاه این چنین نزدیک، عمیق و درعین‌حال ساده نبوده است. این همکاری در زیر چتر حمایت یک مقام دولتی و سیاسی، در واقع نظامی، انجام می‌گرفت. با چنین پدیده‌ای، اصطلاح «مگا دانش»<sup>۲</sup> زاده شد. انسان با این کار، پدیده‌های واقعاً غول‌آسا را همزمان هم متفاد و هم درهم شکست؛ زیرا، انفجار هسته‌ای، که نمای جالبی هم دارد، اثرات وحشتناکی بر جای می‌گذارد و شدت رادیواکتیویته که همراه با هر واکنش هسته‌ای زنجیری است، با آن همه خطری که دارد، موجود زنده در آغاز، مانند تحت تأثیر اشعه X و یا میکروب قرار گرفتن، خطری احساس نمی‌کند، اما این خطر گسترش می‌یابد درحالی‌که ما با وسایل معمولی مکانیکی یا فیزیکی - شیمیایی نمی‌توانیم هیچ کاری روی آن انجام دهیم.

لزم نوعی دخالت جهانی در این زمینه بزودی احساس شد، گرچه گامهای اولیه آن در سال ۱۹۴۷ با شکست روبه‌رو شده بود.

برای این رشته حوادث شگفت‌انگیز، گذشت کمتر از ده سال کافی بود تا دامنه تأثیر آشکار آن بر دانش، صنعت، بهداشت مردم و سیاست، سخن گفتن از آغاز دوران انرژی هسته‌ای را توجیه کنند. انرژی صنعتی محرمانه: با این همه، نوید عمده انرژی هسته‌ای، همانا نوعی انرژی صنعتی تقریباً پایان‌ناپذیر است که هنوز به‌کار گرفته نشده است. گرمای رآکتورهای ایجادکننده پلوتونیم به رودخانه‌ها داده می‌شد و می‌بایستی با شتاب تعدادی نیروگاه الکتریکی ساخته می‌شد تا کارخانه غنی کردن اورانیم ۲۳۵ را برق بدهند.

نخستین کاربرد انرژی هسته‌ای مربوط به سوختهای قراردادی ناوهای امریکاست. این سوختها که تحقیق درباره آنها از سال ۱۹۴۸ آغاز شد در سال ۱۹۵۴ در کشتیهای با سوخت هسته‌ای

۱. زمان نگارش این شرح - م.



(زیر دریاییها، سپس زره‌دارها، کشتیهای نوع فرقت و نیز ناوهای هواپیمابر) به‌کار گرفته شد. اتحاد جماهیر شوروی در سال ۱۹۶۰ (که کاربرد آن را لااقل در یک یخ‌شکن علنی کرده بود) پس از آمریکا به این صف پیوست؛ انگلستان در سال ۱۹۶۳ و فرانسه ۱۹۶۹. اما این کشورها تنها در زیردریاییها آن را به‌کار گرفتند. راکتورها از نوترون گرمایی استفاده می‌کردند. آنها اورانیم غنی شده (از ۵ تا حدود ۹۰٪ برحسب مورد)، آب تحت فشار را، هم برای کند کردن نوترونها و هم انتقال گرمای برخاسته از شکافت سوخت هسته‌ای به دیگهای بخار، که توربینها را تغذیه می‌کنند به‌کار گرفتند.

برتری انرژی هسته‌ای در این زمینه آشکار است: خودگردانی طولی؛ زیرا تنها یک منبع انرژی برای کار یک سال این ماشین کافی است، و نیز اینکه مدت زیادی - تا چند ماه - می‌تواند در زیر آب بماند. بهای زیاد این ماشین و نیز سوخت آنها در برابر این امتیازات، مهم نیست. چنین وضعی، این واقعیت را توجیه می‌کند که با وجود ساختن سه یا چهار ناو اتمی آزمایشی، کشتیهای بازرگانی اتمی هنوز ساخته و حتی مطرح هم نشده‌اند.

این برنامه دریایی جالب (رویهمرفته حدود ۲۰۰ کشتی در سال ۱۹۷۵، فقط ده فروند آنها آمریکایی و روسی نیستند) نمی‌تواند در پیشرفت راکتورهای صنعتی، حتی به‌طور قاطع، حتی در ممالک متحده آمریکا تأثیر نداشته باشد.

همه این دستاوردها پس از جنگ در خفای تقریباً مطلق انجام گرفته بود و شکست مذاکرات مربوط به کنترل جهانی، این مخفی کاری را شدت داد.

ممالک متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی که کارخانه‌های جداکننده ایزوتوپهای اورانیم دارند، پژوهشهای صنعتی خود را به ساختن راکتورهای متمرکز کرده‌اند. که با اورانیم غنی شده تغذیه می‌شوند. کشورهای دیگر (فقط، نخست انگلستان، کانادا و فرانسه) در پی استفاده از اورانیم طبیعی می‌باشند و در این روش برای کند کردن حرکت نوترونها به گرافیت یا آب سنگین نیاز دارند. همه این کوششها در سالهای ۱۹۵۵ - ۱۹۶۵ به ساخت ماشینهایی انجامید که از جنبه فنی رضایت بخش بودند اما ارزش اقتصادی آنها، به‌علت مقدار کار تعداد کم واحدهای نمایشی یا پیش‌نمونه‌هایی که بیش از چند سال کار نمی‌کنند مورد تردید بود.

بدین ترتیب، مسابقه نفس‌گیری آغاز شد که بعدها آن را «جنگ روشها» نامیدند. در همین اوان اتحاد جماهیر شوروی و بعد انگلستان توانستند به سلاح اتمی دست یابند (۱۹۴۹ و ۱۹۵۱). انحصار اتمی و نیز رفته‌رفته مخفی کاری از میان رفت به‌طوری‌که در پایان سال ۱۹۵۳ بر پایه

پیشنهاد آیزنهاور «اتم برای صلح» پدید آمد که میدان را برای خرید و فروش بین‌المللی رآکتورهای هسته‌ای و اورانیم کمی غنی شده لازم برای تعدادی از آنها باز کرد.

نخستین «کنفرانس جهانی برای کاربرد صلحجویانه انرژی اتمی» که سازمان ملل در اوت ۱۹۵۵ آن را در ژنو تشکیل داد بدین «تشنج‌زدایی» جهانی اتمی روشنایی خاصی بخشید و با ایجاد جنبه اقتصادی و صنعتی بدین انرژی اولیه نوین، انگیزه امیدهای پیش از موقعی شد. کنفرانسهای ژنو بعدی در سالهای ۱۹۵۸، ۱۹۶۴ و ۱۹۷۱ اهمیت فنی و تاریخی کمتری دارند. نیروگاههای آماده کار: به زحمت یک سال گذشته بود که «بحران سوئز» (اکتبر ۱۹۵۶) پیش آمد و این بحران ناستواری سیاست ذخیره‌سازی نفت را ثابت کرد و براهمیت انرژی هسته‌ای انگشت گذارد. این هشدار بدون شک ایجاد کمون اروپایی انرژی اتمی (اوراتم)<sup>۱</sup> را که می‌بایست طبق مفاد آن (۱۹۵۷) «... با تشکیل و رشد سریع صنایع هسته‌ای، به بالا بردن سطح زندگی در کشورهای عضو خدمت کند ...» سرعت بخشید.

این هشدار، دوامی نیافت و بازگشت سریع فراوانی نفت، پیشرفت این سیاست آینده‌نگر و منطقی، یعنی بررسی تکامل پیش‌نمونه‌هایی را مانع شد که در صورت تحقق بدون تردید بهترین «پاسخ هسته‌ای» به بحران نفتی دومی بود که شانزده سال پس از آن جهان را به لرزه درآورد. بدون چنین هدفی، صنعت نوزاد هسته‌ای با آشفتگی به پیش رفت. این صنعت که در بازار تنگ و اساساً وابسته به پژوهشهایش فشرده می‌شد، تنها در سال ۱۹۶۵ بود که توانست راه خود را به بازار باز کند، سالی که دو تولیدکننده بزرگ امریکا (جنرال الکتریک، و پس از آن، وستینگهاوس) آمادگی خود را برای فروش نیروگاههای هسته‌ای «آماده کار» با قیمت نیروگاههای متعارفی اعلام داشتند. دروازه بازار که بدین ترتیب با زور باز شده بود کارخانه‌های مذکور، با ترغیب مشتریان خود به خرید آنها، خطر قابل توجهی را پذیرا شدند.

گرچه اطلاع دقیقی در دست نیست، می‌توان حدس زد که ابتکار این سازندگان رآکتور در سال ۱۹۶۵ ارزش یک میلیارد دلار را داشت. شرکت‌های تولیدکننده و توزیع برق می‌بایست هزینه مشابهی را برعهده گیرند که عمدتاً مربوط به زمانگیری فزون بر پیش‌بینی ساخت نیروگاههای هسته‌ای و نیز سرویسهای منظم آن می‌شد. بدین جهت لزوم ساخت نیروگاههای متعارفی یدکی و به تأخیر انداختن خارج کردن نیروگاههای فرسوده از رده، برای پاسخ دادن به تقاضاها و نگهداری حداقل قدرت موجود احساس می‌شد. تردیدی نیست که در کشورهای صنعتی بزرگ دیگر نیز به تناسب قدرت آنها، اوضاع مشابهی وجود داشته است.

۱. Euratom از ترکیب Atom و Europe

بهای نیروگاههای هسته‌ای و سوخت آنها با آهستگی بسیار بخصوص در اثر جنگ اکتبر سال ۱۹۷۳ در بازار بسیار بالا رفت؛ با این حال، بالا رفتن بهای نفت سبب شد که برق اتمی آشکارا بسیار ارزانتر از برق نیروگاههای کلاسیک باشد.

در جهان غرب، برق هسته‌ای رویهمرفته ۵ تا ۱۰٪ تولید کل را تشکیل می‌دهد. برنامه‌ها پیش‌بینی می‌کنند که این درصد در سال ۱۹۸۵ به ۲۵٪ و در پایان این سده به ۵۰٪ برسد. جامعیت تقریبی این فراورده، به تأسیساتی وابسته است و خواهد بود که اورانیم غنی شده را، اساساً در رآکتورهایی که با آب معمولی (تحت فشار یا جوشان) کُند و خنک می‌شوند، به‌کار می‌گیرند. انواع دیگر رآکتورها، در زمان حال، تنها بخش کوچکی از بازار را در دست دارند و از هم اکنون در شرف زوال هستند (شکل ۱۰۵).

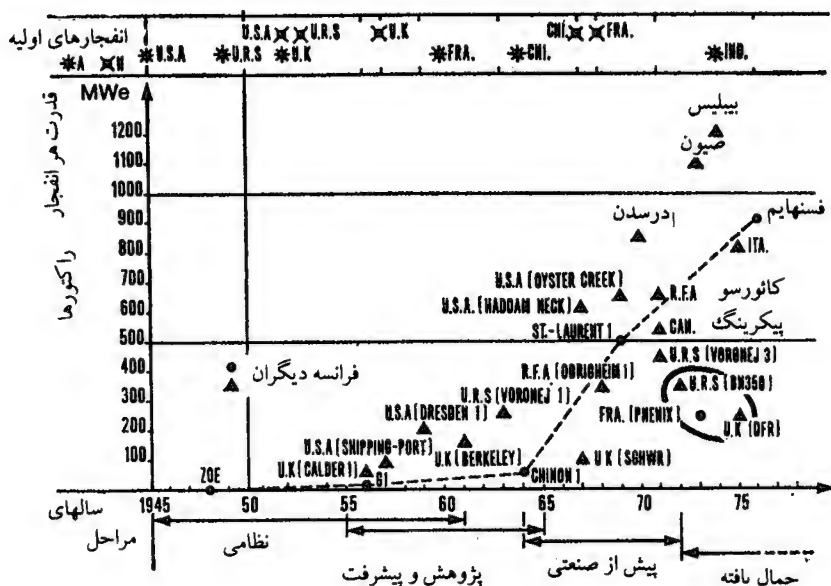
زمینه اجتماعی - اقتصادی: همه این تحولات با مشکلات جدی ساخت صنعتی، نظیر ایجاد و غالباً ناپدید شدن سازمانها (عمومی یا خصوصی) همراه بودند که بعضی از آنها قبل از موقع به‌وجود آمده بودند تا برنامه‌هایی که در زیر فشار اقتصادی، ناگزیر شده بودند اجرا کنند.

بستگیهای ویژه انرژی هسته‌ای به برخی مشکلات سیاسی و اجتماعی، که ما درباره آن سخن خواهیم گفت، نیز روی ساختار تنگناها، که بعدها شدت گرفتند سنگینی می‌کنند. همه اینها سبب می‌شود که موضوع مورد بحث این صفحات، که ویژه تحول یک رشته از فنون است گسترده‌تر گردد. اما چنانچه از زمینه اقتصادی، اجتماعی و سیاسی آن ذکری به‌میان نیاید برخورد درستی با این تحولات نشده است. پیش از هرچیز باید گفت که قبل از اینکه این واقعیت فنی - اقتصادی تقریباً تحقق یابد، انرژی هسته‌ای در بازار و صنعت انرژی عمیقاً راه یافته بود.

از یکسوی، دورنمای یک منبع تازه، قابل توجه - که نسبتاً بخوبی توزیع شده بود - از انرژی اولیه، با کاربرد گسترده سوختهای فسیلی و حفظ رشد آن، که از سده نوزدهم آغاز شده است در مصرف انرژی، شریک بوده است.

از سوی دیگر، این واقعیت که هر قدر اندازه نیروگاهها، چه برای ماشینهای هسته‌ای و چه برای ماشینهای معمولی افزایش یابد قیمت آنها کاهش بسیار دارد منجر به گرایش سریع به‌سوی واحدهای با قدرتهای بسیار زیاد شد: در ۲۵ سال پیش یک گروه  $150\text{ MWé}$  را، قوی توصیف می‌کردند اما اکنون دیگ بخار با سوخت اتمی دارای قدرت  $900\text{ MWé}$  معمولی است و طرحهایی برای ساختن  $1300\text{ MWé}$  در دست است.

بعدها تشعشعات شدید صنعت هسته‌ای، مشکلات ویژه‌ای برای بهداشت عمومی و نگهداری



شکل ۱۰۵. نمائۀ کلی و سادۀ شدۀ تحولات انرژی هسته‌ای از ۱۹۴۵.

در نور بالا، تاریخهای انفجارهای اولیه شکافت، (A) و گداخت، (H) آورده شده‌اند.

در نوار میانی، تغییرات توان واحد راکتورهای اصلی آمده‌اند؛ این تغییرات، مرحله‌ای از پیشرفت یک ملت یا یک نوع ماشین را نشان می‌دهند. پیش‌نمونه راکتورهای بارآور، با خطوط پهن و بیضی شکل احاطه شده‌اند. در نوار پایین، مراحل پایانی گسترش، تقسیم‌بندی مورد گفت‌وگو؛ ادامه مرحله نظامی تا کنون؛ آغاز مرحله پژوهش از سال ۱۹۴۵؛ جروب‌بحث درباره کمال یافتگی کنونی.

از آن - چه در کار معمولی رآکتورها و چه به‌هنگام پیشامدهای کوچک و اتفاقی در آنها، مطرح ساخت. در نتیجه در همهٔ مراحل، سبلی از مسایل فنی و مقرراتی بسیار عظیم‌تر از مسائل و مقررات مربوط به صنایع معمولی سرازیر شد؛ بخصوص، کنترل‌های کیفی، در همهٔ مراحل تولید ماشینها و به‌کاراندازی آنها، نه‌تنها بسیار اکید هستند بلکه باید آنها را علامت‌گذاری و طبقه‌بندی کرد تا پیشینهٔ کاملی از هر قطعه در هر لحظه در دسترس باشد. بنابراین، صنعت هسته‌ای را تنها می‌توان با صنعت فضاوردی مقایسه کرد.

دشواریهای ویژه: تولید انرژی هسته‌ای، لزوماً همراه با فرایندهایی است که در مراحل پیش و پس از نیروگاهها و نیز در خود قسمت هسته‌ای، در رآکتورها، وجود دارند.

نیازی به گفتن ندارد که اساساً، انرژی متعارفی هم، متضمن چنین فرایندهایی، اما در زمینه‌های دیگر است. لوازم انرژی متعارفی، در واقع تقریباً تنها در مراحل پیش از نیروگاه است: معدنهای زغال‌سنگ، چاههای نفت و پالایشگاهها، نقل و انتقال و ذخیره سوخت. چون این ماده عملاً کاملاً در کوره نیروگاه مصرف می‌شود چیزی در مراحل بعدی نمی‌ماند. همچنین آخالها (خاکستر، گردوغبار، گازهای زیانبخش، گرمای تلف شده) مشکلاتی پدید می‌آورند که اهمیت آنها به نسبتی که مصرف انرژی افزایش می‌یابد، بیشتر می‌شود و نیز توده مردم نگران سلامت عمومی و تأثیر زیانبخش صنعت بر محیط زیست می‌شوند.

در باره انرژی هسته‌ای، برعکس، این مراحل پس راکتور است که مراحل پیش از راکتور را تحت الشعاع قرار می‌دهد. در مراحل پیش از راکتور، ما معدنهای اورانیم (و توریم) را کشف می‌کنیم و کانه‌ها را به فراورده‌های آماده تبدیل می‌کنیم، مثلاً عناصر سوختی را در راکتورها وارد می‌کنیم. تعدادی کارخانه‌های شیمیایی و متالورژی، غالباً بسیار معمولی، گاهی هم بسیار مجهز (مثلاً کارخانه‌های جداسازی ایزوتوپها) در این کار سهیم‌اند. چون محتوای انرژی پتانسیل سوخت‌های هسته‌ای حدود یک میلیون بار بیش از انرژی پتانسیل سوخت‌های معمولی است. جریمهای کلی مورد عمل نسبتاً کم می‌باشد، حتی اگر کانه مورد عمل هزار بار فقیرتر باشد؛ گرچه در نیروگاههای هسته‌ای، بخشی از سوختها (چندصدم) مصرف می‌شود.

در عین حال، سوخت‌های تازه و نیز آخالها (فراورده‌های شکافت هسته‌ای) بی در همانجا تشکیل می‌شوند که رادیواکتیویته، مانع ریختن آنها در اطراف است؛ شرایطی و انبار کردن همراه با مراقبت را تحمیل می‌کنند. این قسمت پس از راکتور موظف است که سوخت مصرف نشده (قدیم و جدید) را بازیابی کند و آخال را از آن جداسازد. این کار هم در اصل در ردیف صنایع شیمیایی است و از نظر مقدار مورد مصرف، کار سبکی است اما چون همراه تشعشعات زیانبخشی است که باید دست‌کاری/شوند کاری کاملاً تازه است، آثار این تابشها هم در خود فرایندهای دست‌کاری و هم در مقررات مربوط به مسائل بهداشتی کار و سلامت مردم انعکاس دارد.

این مشکلات که قبلاً در خود نیروگاههای معمولی وجود داشتند در برابر مسائل پیش از راکتور، نسبتاً بسیار کم اهمیت می‌باشند.

پس از این مقدمه، که به علت طبیعت ناگفته و ویژگیهای بسیار خاص انرژی هسته‌ای، لازم به نظر آمد، اینک ما می‌توانیم تاریخ این تکنیک را خلاصه کنیم: نخست، تاریخ نیروگاهها، سپس تاریخ مسائل فرعی در مراحل پیش و پس از راکتور.

## نیروگاههای هسته‌ای

اصول شکافت زنجیری: برای اینکه واکنشی به شکل زنجیری پیش برود می‌بایست جرمی کافی از ماده شکافت‌پذیر، به اصطلاح جرم بحرانی، انباشته شود. در واقع، بسامد شکافتها در واحد زمان، بنابراین شمار نوترونیایی که از آن نتیجه می‌شوند متناسب این جرم هستند، یعنی به عامل شکل، تقریباً به شکل مکعب یک بُعد مشخصه تناسب دارند. شمار نوترونیایی که در همان زمان از جرم مورد بحث خارج و برای واکنش زنجیری از دست می‌روند نیز متناسب با مساحت رویه بیرونی همین جرم است بنابراین، همیشه با عامل شکل، تقریباً مجذور یک بعد مشخصه تناسب دارند. در حقیقت ما هیچ واکنش خود پایداری نخواهیم داشت مگر اینکه شمار نوترونها تولید شده بر نوترونها فراری فزونی یابند. بنابراین رابطه (سطح به حجم) باید از یک مقدار معین کمتر باشد. وانگهی، شمار نوترونها در هر شکافت، که به نوع هسته شکافت‌پذیر (و کمی هم به انرژی نوترون) بستگی دارد برحسب مورد از  $2/3$  تا  $3/5$  تغییر می‌کند. اما بخشی از آنها هم، چنانچه از رویه فرار نکرده باشند بوسیله اجزای دیگر سیستم گرفتار می‌شوند.

چنانچه پس از هر شکافت، یک نوترون موجود باشد واکنش زنجیری برای ایجاد یک شکافت تازه با سرعت ثابتی پیش می‌رود.

احتمال شکافت یک هسته معین شکافت‌پذیر بنوبه خود بستگی به انرژی نوترونی دارد که به آن برخورد می‌کند. برای مهمترین هسته‌های شکافت‌پذیر (اورانیم ۲۳۵ و پلوتونیم ۲۳۹)، زمانی که انرژی نوترون پایین می‌آید این احتمال افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، نوترونها شکافتی مقدار زیادی انرژی جنبشی دارند. بنابراین، برای «کند کردن» این انرژی باید از مواد به اصطلاح «کندساز» استفاده شود. این مواد هسته‌های سبکی دارند که در اثر برخورد نوترونها با آنها، انرژی اولیه نوترونها مصرف می‌شوند و بدون اینکه غالباً گیر بیفتند می‌شوند. با این همه می‌توان سیستمهای (به اصطلاح «با نوترونها سریع») را که عاری از کندساز هستند، هم به کار گرفت.

وانگهی می‌بایست گرمای برخاسته از شکافت را برای استفاده از آن مثلاً در توربینها بیرون برد و برای این کار از یک ماده گرمابر استفاده می‌شود

بنابراین، معلوم می‌شود که اندازه بحرانی نه تنها به نوع هسته‌های شکافت‌پذیر بستگی دارد بلکه به مواد دیگر به کار رفته، نسبت و ترتیب هندسی آنها نیز مربوط می‌شود.

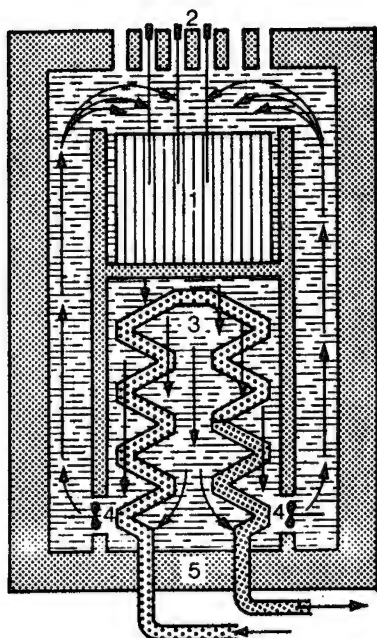
غالباً بهتر است که ماده شکافت‌پذیر را به طور نسبتاً فشرده به کار گرفت و به طور فیزیکی از ماده کندساز و نیز ماده گرمابر جدا نگه داشت. در این صورت، از «راکتورهای ناهمگون» سخن می‌رود

و حال آنکه در «رآکتورهای همگون» ماده شکاف‌پذیر، در کندساز محلول یا به‌طور ظریفی در آن پخش شده است.

مواد گرمابر و کندکننده ممکن است یکی باشند یا نباشند. انتخاب این یا آن، دلایل اقتصادی و هسته‌ای دارد. تنها مواد کندکننده مورد استفاده عبارتند از: کربن به‌شکل گرافیت صنعتی، هیدروژن به‌شکل آب یا بعضی از هیدروکربنها، عنصر دوتریم به‌شکل آب سنگین، عنصر بریلیم در شکل فلزی یا اکسید آن. تنها مواد گرمابر مورد استفاده عبارتند از: آب، آب سنگین، گاز کربنیک، عنصر هلیوم، سدیم مذاب. کوشش شده است که ماده گرمابر مخلوطی از نمک مذاب فلوئورید سوخت مایع به‌شکل اورانیم تترافلوئورور باشد. این کوشش به موفقیت انجامیده، اما کاربرد صنعتی نیافته است. سرانجام، سوخت می‌تواند اورانیم ۲۳۵ کم‌ویش غنی شده، پلوتونیم ۲۳۹، اورانیم ۲۳۳ باشد (تنها اورانیم ۲۳۵ در طبیعت وجود دارد، دو سوخت دیگر از فراورده‌های صنعت هسته‌ای می‌باشند). به‌طورکلی، این سوخت با هسته‌های بارآور مخلوط یا مقابل هم گذاشته می‌شود تا در اثر گیراندازی نوترون و رادیواکتیویته حاصله، هسته‌های شکافت‌پذیر زیر تهیه شوند:



انواع رآکتورها: هر ترکیب (شکافت‌پذیر + بارآور + کندساز + گرمابر) در اصل مرتبط به مواد ساختمانی مخصوص، ویژه خانواده‌ای از رآکتورهاست (که از ۲۰۰ نوع افزون‌اند)، که هرکدام شامل مدل‌های مختلفی (جدول ۱) هستند. حتی چنانچه خود را در چارچوب ارزانترین و ساده‌ترین رآکتورها محدود کنیم، با انواع زیادی رآکتور روبه‌رو می‌شویم که جدول II نمایی از آنها می‌دهد، درحالی‌که رآکتورهایی را بخاطر بررسیهای فیزیکی یا پژوهشهای روی مواد ساخته شده‌اند به‌حساب نیاورده‌ایم، که ۱۷ ترکیب هستند که ۱۵ ترکیب آنها لااقل تا ساختار رآکتور آزمایشی یا پیش‌نمونه پیش رفته‌اند. دو نوع دیگر، رآکتورهای سریعی که با هلیوم یا بخار آب خنک می‌شوند موضوع بررسیهای پیگیر هستند. از میان نوع نخست، ۹ مدل (A تا I) دارای پیشرفت صنعتی بودند. سه‌تای از آنها (A, B, E) (شکل ۱۰۶) اکنون کنار گذاشته شده‌اند (یعنی از سالهای ۱۹۶۵ - ۱۹۷۰ از این رآکتورها دیگر ساخته نشده است، گرچه از آنهایی که مانده‌اند استفاده می‌شود و آنهایی را که تمام نشده بودند تمام کرده‌اند)، حال آنکه رآکتورهای دیگر که هنوز گویا ساخته نشده‌اند ممکن است آینده‌ای داشته باشند (رآکتورهای سریعی که با هلیوم خنک می‌شوند، رآکتورهای  $D_2O$  و گرمابر آلی رآکتوری با آب تحت فشار با چرخه  $ThU - 233$  و رآکتور با نمکهای مذاب). درحال حاضر رآکتورهای ساخته یا سفارش داده شده اکثراً از نوع F و G هستند (رجوع



شکل ۱۰۶. راکتور گرافیت-گاز با اورانیم طبیعی یا کمی غنی شده (AGR). همان‌طور که در نمایه‌های بعدی راکتورها نشان داده می‌شوند، حفاظ بیرونی، روکشی است که همه نیروگاههای هسته‌ای آن را دارند. گروه توربو-آلترناتور نشان داده نشده است. ۱. دل راکتور؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. تعویض‌کننده بخار؛ ۴. بادبزن جریان‌دهنده گازها؛ حفاظ از بتون پیش تنیده.

جدول ۱

U۲۳۳	Pu۲۳۹	U۲۳۵	هسته‌های شکافت‌پذیر				
	Th۲۳۲	U۲۳۸	هسته‌های بارآور				
BeO	Be	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	D <sub>۲</sub> O	C	H <sub>۲</sub> O	کندسازها	
(MF <sub>x</sub> )	Na	He	CO <sub>۲</sub>	D <sub>۲</sub> O	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	H <sub>۲</sub> O	گرمابرها



جدول ۲

Pu۲۳۹ یا U۲۳۳ ۲ و ۳ و ۴ U۲۳۸ یا Th۲۳۲			U۲۳۵ یا ۲۳۳ ۱ و ۲ و ۳ U۲۳۸ یا Th۲۳۲			U۲۳۵ مخلوطی که با U۲۳۵ کمی غنی شده است ۱			U۲۳۵ مخلوط طبیعی ۱			هسته شکافت‌پذیر هسته بارآور		
(U, Pu)O <sub>r</sub> (U, Pu)C A	UF <sub>۴</sub> ۷	UO <sub>۲</sub> یا UC ۶	UO <sub>۲</sub> SO <sub>۴</sub> ۵	UO <sub>۲</sub>	UC	U فازی	تولید صنعتی							
							H <sub>۲</sub> O	C	D <sub>۲</sub> O	D <sub>۲</sub> O	D <sub>۲</sub> O	C	C	
۱	C	C	H <sub>۲</sub> O یا D <sub>۲</sub> O	H <sub>۲</sub> O	C	D <sub>۲</sub> O	D <sub>۲</sub> O	D <sub>۲</sub> O	D <sub>۲</sub> O	C	C	کندکننده		
H <sub>۲</sub> O	He	Na	LiF ۷	Na	He	H <sub>۲</sub> O	H <sub>۲</sub> O	C	D <sub>۲</sub> O	D <sub>۲</sub> O	C	C	گرماور	
	۱			H		G	F	A'	E	D	C		تولید صنعتی	
	۲۰			۱۹		۱۸	۱۷	۱۲	۱۶	۱۵	۱۴			
	۰/۶۷			۰/۷		۲۳	۲۴	۳	۰/۳۳	۰/۲۵	۳	۰/۱۸	نصب شده	
	۲			۷		۸۴	۲۰۷	۹	۶	۴	۸		در حال ساخت	
													سفارش داده	
													۷۶ در آغاز سال ۷۶	
													۲۱	

۱۱

۱. بخشی از Pu تشکیل شده در این راکتورها در همان‌جا مصرف می‌شود. همچنین می‌توان Pu را به دل‌خواه، بتامی یا به‌طور جزئی با U۲۳۵ تعویض کرد. مخلوط طبیعی دارای نوع صنعتی

۲. توان مصرفی (در) ۱۰۰۰ MWé در حال ساخت  
در آغاز سال ۷۶

۳. نصب شده  
در حال ساخت  
سفرارش داده  
شده

۴. سوخت  
کندکننده  
گرماور  
کندکننده

۵. سوخت  
کندکننده  
گرماور  
کندکننده

۷. فلوتوورهای  $UF_6$  و  $EnF$  در حالت مذاب، به کار می‌روند، اما فلوتوورهای دیگری نیز بدان می‌افزایند تا نقطه ذوب پایین آید (تنها یک راکتور نمایشی در آمریکا چنین عمل می‌کند).

۸. کاربرد نیترونها یا سیلیسیورها هم مورد نظر هستند، اما عملی نشده‌اند.

۹. منظور راکتورهای بانوترون سریع هستند که از واکنش هسته‌های بالور با هسته‌های شکافت‌پذیر که آنها را مصرف نمی‌کنند، تولید می‌شوند. «راکتورهای بالور» از این لحاظ نامیده شده‌اند.

۱۰. کدکند، خنک می‌ماند ( $C = 8^\circ$ ).

۱۱. مخلوطهای ترنیلها یا مشتقات آنها منظر هستند. تنها یک راکتور از این هیدروکربنها به عنوان کدسار و گرابر استفاده می‌کند. دلیل صورت سوخت غنی‌شده ضرور است.

۱۲. این راکتورها، هرگاه با اورانیم طبیعی تغذیه شوند صرفاً برای به دست آوردن پلوتونیم، به کار می‌روند و از تولید الکترسیسته ناتوانند؛ زیرا در دماهای بالا کار نمی‌کنند. اما زمانی که از اورانیم غنی شده استفاده کنند این توان را دارند. در چنین حالتی آنها از خانواده  $A'$  هستند که تنها در اتحاد جماهیر شوروی [اسائو] ساخته می‌شوند.

۱۳. روش اورانیم طبیعی - گاز - گرفت که در سالهای ۱۹۶۰ - ۱۹۶۵ در فرانسه و انگلستان به کار گرفته می‌شد، اکنون کنار گذاشته شده است.

۱۴. نوع کانادایی Candu که کوتاه شده Uranium oxide Deuterium oxide CANadian است که چند واحد از این نوع به کشورهای درحال توسعه فروخته شده‌اند.

۱۵. نوع کس از سال ۱۹۷۴ در انگلستان پذیرفته شد.

۱۶. از مدل AGR، کوتاه شده Advanced Graphite Reactor در حدود سال ۱۹۶۰ استقبال شد اما پس از ۱۹۷۰ کنار گذاشته شد. این مدل احتمالاً می‌توانست به موفقیت‌هایی

بیانجامد.

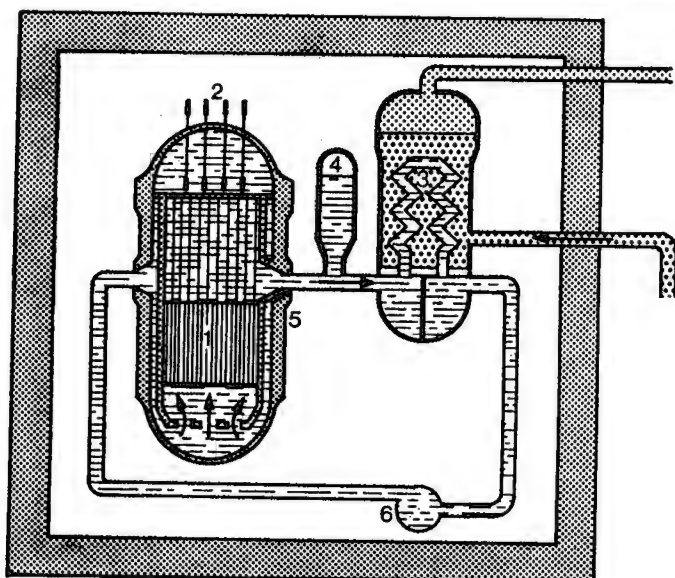
۱۷. مدل PWR، کوتاه شده Pressurized Water Reactor، مستقیماً از نوع راکتورهای کشتی اقتباس شده است، گرچه تفاوت زیادی از نظر بها و طراحی با آنها دارد. بازار این نوع راکتور مستقیم یا غیرمستقیم، در دست وستینگهاوس است. تعدادی از این نوع راکتور در ممالک متحده آمریکا و کشورهای دیگر، پیروژه در اروپای غربی (به استثنای بریتانیای کبیر) فعال یا در مرحله ساخت می‌باشند. این تنها مدل راکتور بانوترون کد برنامه هسته‌ای فرانسه از سال ۱۹۷۴ به بعد است.

۱۸. مدل BWR، کوتاه شده Boiling Water Reactor، ساخت مستقیم یا غیر مستقیم جنرال الکتریک است. این مدل در ممالک متحده آمریکا و دیگر کشورها فعال است، گرچه رواج آن به اندازه PWR نیست.

۱۹. این راکتورها برای رسیدن به دماهای بسیار بالاتر از راکتورهای پیشین، ساخته می‌شوند  $C = 80^\circ$  یا بیشتر. در برابر  $C = 350^\circ$ ، بدین ترتیب، می‌توانند توربولانتورهای بسیار جدید، حتی احتمالاً توربینهای گازی را تغذیه کنند و گرمای مورد نیاز تعدادی صنایع شیمیایی را تأمین سازند. این راکتورها با دشواری زیاد به بازار راه یافتند.

۲۰. راکتورهای بالور با نوترونها سریع می‌توانند توربو الکتراورها را با بخار داغ  $C = 550^\circ$  تغذیه کنند. از نظر اقتصادی و صنعتی گرچه قابل قبولند اما آینده دور به آنها خوش آمد می‌گوید. تنها چند دستگاه نمایشی و دو پیش‌نمونه از آنها فعال می‌باشند.

۲۱. ارقام مزبور گرد شده‌اند. می‌توان به یاد آورد که واحدهای فعال تا سال ۱۹۶۰ توانشان  $10^6$  تا  $10^7$  MWه بود و در سال ۱۹۷۵ به  $400 \times 10^6$  MWه رسید و اکنون  $10^9$  MWه به ۹۰۰ یا بیشتر توان دارند.

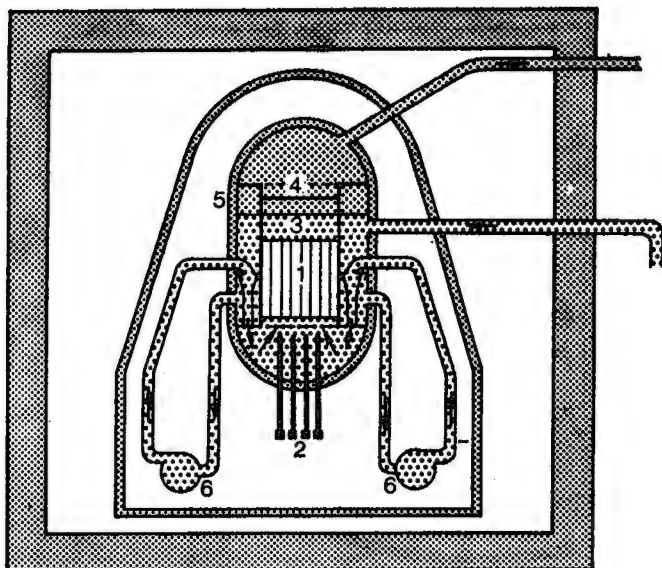


شکل ۱۰۷. رآکتور با آب تحت فشار (PWR).

۱. دل؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. مولد بخار؛ ۴. مخزن فشار آب؛ ۵. ظرف فولادی؛ ۶. تلمبه‌ای که آب را بین دل رآکتور و مولد بخار می‌گرداند.

کنید به‌شکلهای ۱۰۷ و ۱۰۸ و نیز) شباهتهایی با انواع C و D دارند. پایه برنامه‌های مهم الکتروهسته‌ای پایان این سده بر روی آنها گذارده شده است. رآکتورهای گروه H و I رفته‌رفته جا می‌افتند و در سالهای پس از ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ اکثریت خواهند شد (رجوع کنید به شکل ۱۰۹). این نکته را باید تأکید کرد که طرحهای گوناگون رآکتورها و برگزینی مواد مختلفی که می‌توانند به‌کار گرفته شوند از مدتها پیش (قبل از ۱۹۵۵) طراحی و معین شده‌اند. اما برای اینکه طرحها به مرحله عمل صنعتی، اقتصادی و از نظر فنی قابل اعتماد برسند راه بسیار طولانی و دشواری برای تکمیل و راه‌اندازی در پیش دارند. این کار باید در همه زمینه‌ها از طرح کلی سیستمها تا نقشه‌کشی قطعات و بررسی دقیق مواد انجام گیرد.

ساختمان رآکتور: شکافت زنجیری به‌عنوان یک احتراق شیمیایی سرچشمه‌ای از گرما و انرژی سرکش است. از این روی آن را کوره (یا دیگ) هسته‌ای نیز نامیده‌اند و ماده شکافت‌پذیر را که شکل شیمیایی و مکانیکی مناسبی یافته است سوخت هسته‌ای می‌نامند، که عناصری از سوخت مؤثر



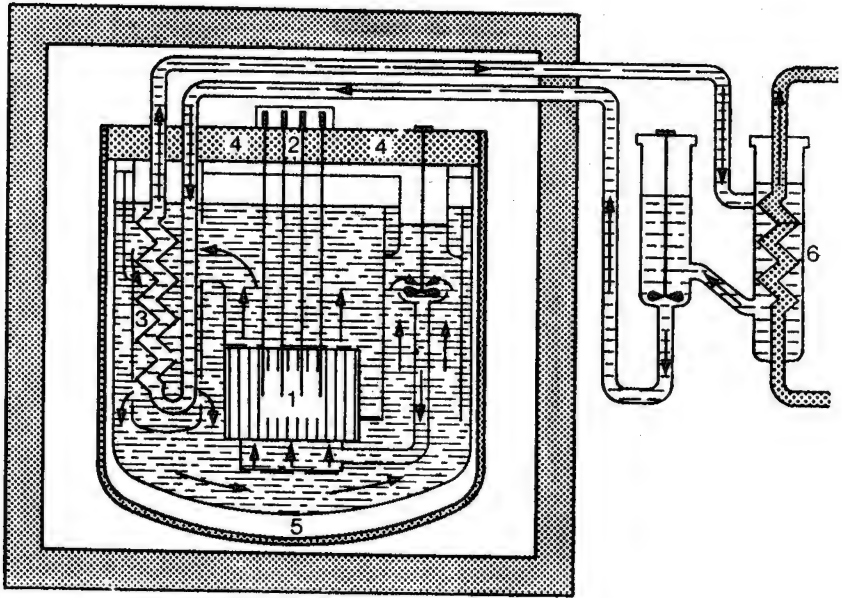
شکل ۱۰۸. رآکتور با آب جوشان (BWR).

۱. دل رآکتور؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. مخلوط آب و بخار؛ ۴. جداکننده و خشک‌کننده بخار؛ ۵. ظروف فولادی؛ ۶. تلمبه‌های جریان‌دهنده آب اولیه.

در رآکتورها را در خود دارد.

این گرما باید بوسیله‌ای انتقال یابد که جزئی از آن را به انرژی ساماندار و قابل استفاده تبدیل کند. این امر متضمن انتقال گرما از طریق سطوح تبادل آن است. اما گرچه محیط گیرنده (به‌طور کلی آب) در یک رآکتور و یک دیگ بخار کلاسیک تفاوتی با یکدیگر ندارند، فرستنده در یک رآکتور می‌تواند چگالی توان قابل توجهی داشته باشد که باید مهار زده شود تا از محدوده‌ی شاره‌گرایی که می‌توان آن را منتقل و تخلیه کرد تجاوز نکند. این محدوده برای هر سانتیمترمربع، تقریباً صد وات است. (می‌توان انتظار یک کیلووات در هر سانتیمترمربع را در شرایط خاصی، مثلاً در لامپهای فرستنده رادیو با توان زیاد داشت. اما در رآکتورهای اتمی و دیگهای بخار، میانگین آن از ۲۰ تا ۵۰ وات در سانتیمترمربع است).

در هر رآکتور، بسته به نوع آن، از داخل به خارج قطعات زیر را می‌توان یافت: دل، منطقه دور دل، صندوقچه، حفاظ، دیواره بتونی. ضمایمی نیز آن را تکمیل می‌کنند.



شکل ۱۰۹. رآکتور با نوترونهای سریع که با سدیم مایع خنک می‌شود.

۱. دل؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. تعویض‌کننده اولیه سدیم-سدیم؛ ۴. ظرف دوتایی تعویض‌کننده دوم سدیم-آب-بخار (چرخه سه‌گانه).

دل: دل مجموعه‌ای از عناصر سوختی و ساختاری است که درحالی‌که گردش مایع گرماب‌ر را تأمین می‌کنند عناصر سوختی را نگاه می‌دارند. دل شامل کندساز نیز می‌باشد و این زمانی است که ماده کندساز، همچون مورد پیل‌های گرافیتی، جامد باشد و محل مکانیسمهای تنظیمی را نیز سامان می‌دهد. دلها در رآکتورهای گوناگون و حتی در رآکتورهای مختلف از یک‌نوع با یکدیگر تفاوت زیاد دارند.

چگالی توان میانگین در انواع رآکتورها با یکدیگر متفاوتند (در دل رآکتورهای گرافیتی-گازی اورانیم طبیعی حدود چند کیلووات گرمایی در هر لیتر است، اما در رآکتورهای با آب تحت فشار یا جوشان به ۱۰۰ کیلووات گرمایی می‌رسد و در رآکتورهای با نوترونهای سریع ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلووات گرمایی در هر لیتر است) که به‌طور کلی از چگالی دیگهای معمولی کنونی بخار بیشتر است.

منطقه دور دل: گرچه بیشتر نوترونها در دل به وجود می‌آیند و نابود می‌شوند، درصد قابل توجهی (که به تناسب رابطه سطح به حجم و نوع هسته، تغییر چشمگیری دارند) از آنها فرار می‌کنند و منطقه دور دل باید آنها را جبران کند. این کار از دو راه عملی است، دو راهی که ناقض یکدیگر نیستند. در رآکتورهای با نوترونهای گرمایی، دل را با یک بازتابنده، معمولاً گندسازی که پس از کند کردن، بیشتر نوترونهای فراری را به سوی دل برمی‌گرداند می‌پوشانند. راه دوم، که معمولاً در رآکتورهای بارآور با نوترونهای سریع مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کار گرفتن یک پرده یا روکشی اساساً از ماده «بارآور» است که نوترونها را طوری جذب می‌کند تا از آنها هسته‌های شکافت‌پذیری از نو بسازد. ظرف فولادی: دل و بازتابنده (یا پرده) در ظرفی یا صندوقی گذاشته می‌شوند که کاملاً بدون منفذ است و فشار لازم برای نگهداری ماده خنک‌کننده، که ثابت یا در گردش است، را اعمال می‌کند. مثلاً، مقدار فشار در صندوق بزرگترین رآکتورهای گرافیتی-گاز کربونیکی با اورانیوم طبیعی (حجمی در حدود  $6000 \text{ MWé}$  مترمکعب و توان  $500 \text{ MWé}$ ) بیست و هفت اتمسفر است. ظرفهای رآکتورهای با آب تحت فشار با  $1000 \text{ MWé}$  حجمی در حدود  $150$  مترمکعب و فشاری برابر  $150$  اتمسفر را تحمل می‌کنند (برای رآکتور با آب جوشان، حجم  $300$  مترمکعب و فشار  $72$  اتمسفر است). در عوض ظرف رآکتورهای با آب سنگین از نوع کانادایی یا انگلیسی، فشاری بیش از دو اتمسفر تحمل نمی‌کنند زیرا در این دو مدل با استوانه‌هایی برخورد می‌کنیم که محتوی آب سنگین بسیار سرد می‌باشند. لوله‌های تحت فشار از درون آن عبور می‌کنند و ماده خنک‌کننده درون آنها عناصر سوختی را دور می‌زند و فشار مکانیکی، روی آنهاست، بنابراین ظرف متحمل فشاری نمی‌شود.

همچنین باید گفت که ظرفهای مربوط به رآکتورهای با نوترونهای سریع، که با سدیم مایع خنک می‌شوند، در زیر فشارهای کمی هستند. ساخت این ظرفها و صندوقها، کار پیچیده‌ای است و غالباً آنها را از فولاد می‌سازند.

در مورد رآکتورهای گرافیتی با بزرگی ( $10$  تا  $15$  متر طول و همین اندازه ارتفاع)، ورقهای فولاد برای ساختن ظرف (که ضخامت آنها به  $9/5$  سانتیمتر می‌رسد) در جا جوشکاری می‌شوند. بازرسی محل جوش و بویژه تابکاری مجموع، مشکل بسیار بزرگی است.

رآکتورهای با آب تحت فشار، به ظرفهای استوانه‌ای با قطر چهار متر نیاز دارند. ته و سر این استوانه، گنبدی است و ارتفاع آن به  $12$  متر می‌رسد، درحالی‌که ضخامت ورق  $20$  سانتیمتر است. درون این استوانه‌ها روکشی از فولاد زنگ‌ناپذیر دارد تا از خوردگی جلوگیری (کاربرد فولاد

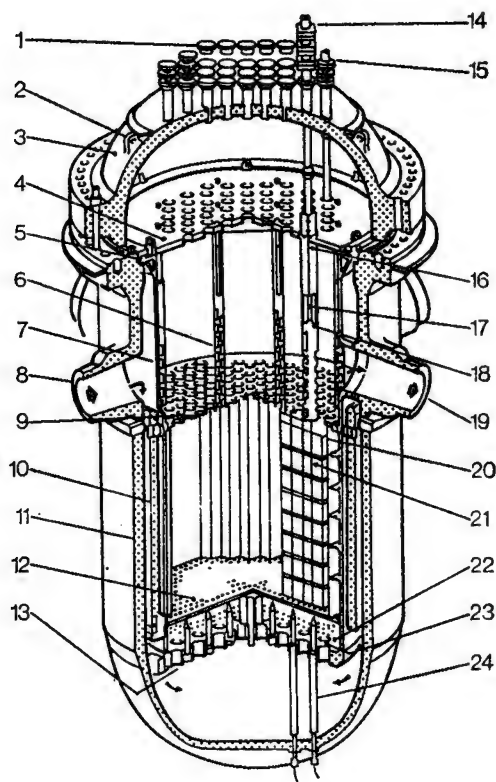
زنگ‌ناپذیر برای همه استوانه، بسیار گران تمام می‌شود). وزن آنها حدود ۳۰۰ تن است. بالاخره باید گفت که لوله‌های بزرگ باید به این صندوق اتصال داشته باشند، کاری که ساخت آن را دشوارتر می‌کند (شکل ۱۱۰).

در رآکتورهای BWR، که فشار آب کم و ضخامت ۱۵ سانتیمتر کافی است. برعکس، قطر و ارتفاع آشکارا بزرگتر می‌باشند و وزن از ۵۰۰ تن فراتر می‌رود. ارتفاع باید در حدی (۲۱ متر) باشد تا با قرار دادن وسایلی در آن بتوان بخاری که مستقیماً در توربین به‌کار گرفته شده است بدون هیچ‌گونه قطرات آب باشد (انحناهایی داده می‌شود تا حالت مرکزگریزی پدید آید). با این قطر زیاد (۵/۵ متر) می‌توان افشانه‌هایی درون ظرف، بیرون از خود دل گذاشت که مدار نسبتاً کوچکی از آب تحت فشار آنها را تغذیه می‌کند و آب کافی را درون دل جریان می‌دهند.

در فرانسه در سال ۱۹۵۵ رآکتورهای گرافیتی-گازی  $C_2$  و  $C_2$  مارکول<sup>۱</sup> صندوقهایی از بتون پیش‌تنیده دریافت داشتند که با یک آستر داخلی نسبتاً نازک از فولادها، آب‌بندی شده بودند. این صندوقها که کاملاً بجا، با نام طاق نصرت اتوال شهرت یافتند رضایت‌بخش بودند. این تکنیک که به هدف «مجتمع» لوازم سنگین، تکامل یافته است، در همه رآکتورهایی که با گاز تحت فشار خنک می‌شوند به‌کار گرفته می‌شود. امکان کاربرد آن با رآکتورهای آبی هم آزمایش شده است، اما هنوز از مرحله مدلهای کوچک آزمایشی فراتر نرفته است.

این لوازم سنگین عبارتند از: مبادله‌گرهای گرما و ماشینهای سوخت‌گردان.

مبادله‌گر گرما: این دستگاه، گرمای مایع گرمابر اولیه را به آبی منتقل می‌کند که تبخیر می‌شود و توربین را می‌گرداند. تاکنون، با موفقیت از بخار اولیه رآکتورهای با آب جوشان برای گردانیدن توربینها استفاده کرده‌اند. این کار مستلزم داشتن اطمینان بسیار زیاد به‌کار غلافهای سوخت است، زیرا نشت بسیار کم هم می‌تواند بخاری که توربین را می‌گرداند، کندانسور و مدارهای وابسته به آن را با رادیواکتیویته خطرناکی آلوده کند. اما گاهی از کاربرد دستگاه خنک‌کننده آب، که در بسیاری از رآکتورها ضروری است، صرفه‌جویی می‌شود. این کار بویژه در رآکتورهای PWR (شکل ۱۱۱) (که دستگاههای بخارساز آن، که مهم می‌باشند، حتی از خود ظرف فولادی رآکتور حجیمتر خواهند بود و در ضمن، ساخت و در مواقع ضرور، تعمیر آن نیز دشوار است)، و در رآکتورهای با نوترونهای سریع - که یک مدار اولیه از سدیم بسیار رادیواکتیو، گرما را از دل رآکتور به مدار دیگری از سدیم انتقال می‌دهد که رادیواکتیو نیست، یعنی مداری که بنوبه خود مدار آب - بخار را تغذیه می‌کند - عملی شده است.

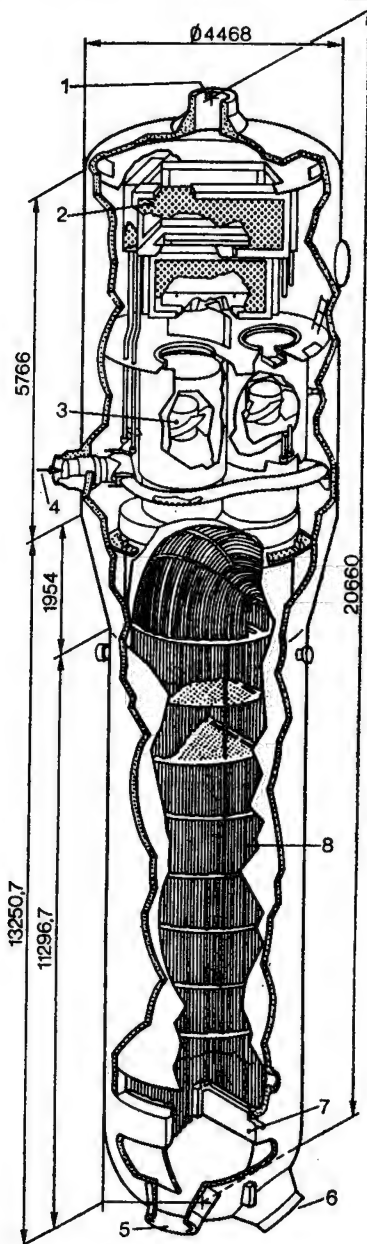


شکل ۱۱۰. ظرف و دل یک راکتور با آب تحت فشار PWR.

روی راکتوری با توان MWé ۹۰۰ قطر ظرف حدود چهار متر است و ضخامت ورق آن ۲۰ سانتیمتر، و ارتفاعش ۱۲ متر.

۱. آداپتور سرهای میله‌های تنظیم؛ ۲. دستگیره تنظیم؛ ۳. سرپوش؛ ۴. ورق پشت‌بند بالا؛ ۵. قطعات درونی؛ ۶. بستها؛ ۷. لفاف دل؛ ۸. لوله ورود آب اولیه؛ ۹. ورق فولادی بالای دل؛ ۱۰. پرده گرمایی؛ ۱۱. ظرف فولادی؛ ۱۲. ورق پایین دل؛ ۱۳. ته لفاف دل؛ ۱۴. مکانیسم سرهای میله‌های تنظیم؛ ۱۵. گذرگاه آلات و ابزار؛ ۱۶. لوله راهنما؛ ۱۷. میله راه‌اندازی؛ ۱۸. پیوست سرهای تنظیم؛ ۱۹. لوله خروج آب اولیه؛ ۲۰. تیغه؛ ۲۱. سوخت؛ ۲۲. ورق پخش آب در ورودی دل؛ ۲۳. ستون دستگاه؛ ۲۴. گذرگاه آلات و ابزار.





شکل ۱۱۱. دستگاه بخارساز راکتور با آب تحت فشار.

۱. خروج بخار؛ ۲. خشک‌کننده بخار؛ ۳. جداکننده بخار از آب؛ ۴. ورود آب اصلی؛ ۵. ورود آب اولیه به راکتور؛ ۶. خروج آب اولیه از راکتور؛ ۷. صفحه لوله‌خور؛ ۸. لوله‌آلات.

ماشینهای سوختگردان: این ماشینها می‌بایست بارزنی، تخلیه و دیگر کارهای جابه‌جاسازی عناصر سوختی را انجام دهند. این ماشینها که پس از کمی کار بسیار رادیوآکتیو می‌شوند (در هر کیلوگرم  $235\text{U}$ ، میلیونها کوری) باید از دور فرمان بگیرند. آنها عناصر کار شده (یا فرسوده) را در ظرفهایی قرار می‌دهند تا امکان حمل آنها باشد. این ماشینها لزوماً بسیار سنگین هستند زیرا می‌بایست جلوی تابشهای نافذ شدید را بگیرند و گرمای آنها را از بین ببرند؛ ساخت آنها دشوار است چون باید بسیار نفوذناپذیر باشند و فرمانهای از دور را بپذیرند.

در رآکتورهای اورانیم طبیعی، معمولاً لازم است که سوختگردانی به‌هنگام اوج کار رآکتور انجام گیرد، اما در رآکتورهای نوع دیگر، این کار بسادگی در زمان توقف کار، یک بار در هر سال، همراه با تعمیرات اصلی است.

تنظیم، تأمین و اندازه‌گیری: قطعات تنظیم‌کننده، تأمین و تجهیزات اندازه‌گیری و وسایل الکترونیکی مربوط به آنها، حجمی بسیار کمتر دارند اما بسیار ظریفتر، اساسیتر و پیچیده‌تر هستند. در واقع رآکتورها در کار معمول خود بسیار پایدار می‌باشند و به‌هنگام بی‌نظمیهای تصادفی، از جمله بالا رفتن سریع توان آنها (از  $1/10$  به  $10$ )، دل‌های آنها به‌طوری طراحی و حساب شده‌اند که یک داغ شدن و حتی مقداری اتلاف ماده خنک‌کننده، شدت رادیوآکتیویته را کاهش می‌دهد و واکنش زنجیری متوقف می‌شود (پایداری سرشتی نوترونی). رآکتورهای آزمایشی متعددی برای نشان دادن چنین «تغییرات توان» ساخته و به‌کار گرفته شده‌اند و حتی آنها را در معرض «حوادث عمدی» قرار داده‌اند، مثلاً با بیرون کشیدن یک دل کامل، یک عنصر سوختی را ضایع می‌کنند. باید بر اهمیت این نمایشها و نیز دشواری درک و تفسیر چنین آزمایشهایی روی مدل‌های کوچک نمایشی انگشت گذارد.

زنجیرهای تنظیم (دوگانه یا سه‌گانه) (اندازه‌گیری - ثبت - فرمان الکتریکی - فرمان مکانیکی)، باید سریع و بدون اشکال باشند. کامپیوترها صدها عدد مختلف را، که هم روی قطعات هسته‌ای و هم روی اجزای معمولی نیروگاه تأثیر دارند گردآوری می‌کنند، آنها را تفسیر می‌کنند آن‌گاه به مکانیسمهای تنظیم، فرمان می‌دهند. وسایل خنک‌سازی و امنیت‌بخشی که می‌توانند به فوریت و با قوت عمل کنند نیز پیش‌بینی شده‌اند.

سپر بتونی: بازتابنده (یا روکش) و صندوق برای بیخطر کردن تابشهایی که با شکافت زنجیری همراه‌اند کافی نیست. این مجموعه باید با نوعی سپر حمایتی پوشیده شود که شدت تابشهای مختلف را بر  $10^9$  یا برحسب مورد به  $10^{11}$  تقسیم می‌کند و آن را برای شخصی که در معرض

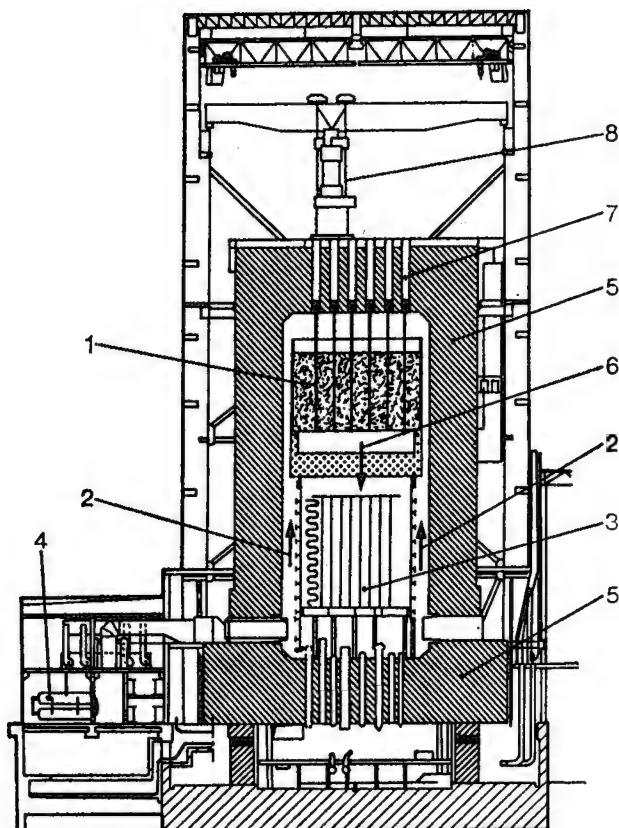
آن است بیخطر می‌سازد؛ مقداری که از مقدار تابش رادیواکتیو زمینی و کیهانی در نقاط مختلف زمین، کمی بیشتر است.

این سپر معمولاً دیوار ستبری ( $5 \pm 2$  متر) از بتون فشرده است. وجود آن مطمئناً عملیات سوخت‌گردانی را تسهیل نمی‌کند. نمی‌توان حتی فکر جادادن آن را در صندوقهای فولادی، داشت زیرا ساخت این صندوقها دشوارتر و پرهزینه‌تر از آن است که به میل خود اندازه آنها را بیشتر کنند. اما صندوقهای ساخته شده از بتونهای پیش تنیده می‌توانند به‌طور کامل یا جزئی سپرهای حفاظتی به‌شمار آیند. افزایش بزرگی آنها به اندازه صندوقهای فولادی دشوار و پرهزینه نیست. و نیز به برکت چنین صندوقهایی است که تصور نیروگاههای «مجتمع» قوت می‌گیرد، زیرا در اطاقی از بتون پیش تنیده، که گرچه ساخت آن هم دشوار است، اما دل، مبادله‌گرها، ماشینهای سوخت‌گردان، وسایل تنظیم و تأمین جملگی در آن قرار دارند. از تنها منفذهای بزرگ این اطاق، علاوه بر توربینها، بعضی دستگاههای کمکی و تغذیه‌کننده‌های برقی را به مجموعه رآکتور مربوط می‌سازند (شکل ۱۱۲). برتری دیگر بتونهای پیش تنیده بر صندوق فولادی، وجود خطر کمتر اشتعال رآکتور در نتیجه فشار زیادی است که نخستین شکاف را پدید می‌آورد.

پوشش نفوذناپذیر: در پایان باید گفت که هر رآکتور در پوشش نفوذناپذیری قرار دارد تا محتوی فراورده‌های رادیواکتیو آن، در صورت وقوع حادثه‌ای نتواند آزاد شوند. این پوششها به علت بزرگی زیاد: ۳۰ تا ۴۰ متر قطر، ۶۰ متر یا بیشتر ارتفاع و نیز این واقعیت که باید فشار زیادی (برحسب مورد ۱ تا چند اتمسفر) را تحمل کنند و نشت بسیار کمی داشته باشند (در هر روز ۱٪ یا کمتر)، هزینه گزافی را ایجاب می‌کند. آنها تنها برای پوشش رآکتورهای «مجتمع»، رآکتورهایی که در آنها بتون پیش‌تنیده به‌کار رفته است و نیز برای رآکتورهای پژوهشی به‌کار گرفته می‌شوند که توان معمولی آنها چنان کم است که در صورت وقوع حادثه، مقدار کمی رادیواکتیویته منتشر می‌شود.

این پوشش نفوذناپذیر در تمام تأسیساتی که در مراحل پس از رآکتور قرار دارند و مواد دارای رادیواکتیویته زیاد را دست‌کاری می‌کنند به‌کار گرفته می‌شود.

زره‌های ایمنی: بدین ترتیب، دیده می‌شود که بین محیط بیرونی نیروگاه و سوخت هسته‌ای آن، رادیواکتیویته شدیدی وجود دارد و به همین جهت سه زره ایمنی در آن فضا گذارده می‌شود: غلاف که سوخت را از گرما بر جدا می‌سازد؛ بین گرما بر اولیه و مدار آب - بخار که توربین را تغذیه می‌کند ظرف فولادی یا صندوق وجود دارد. زره سوم از نوعی کمر بند امنیتی تشکیل می‌شود. در سیستمهای مجتمع و نیز در رآکتورهای با آب جوش و دارای مدار مستقیم، تنها دو زره امنیتی



شکل ۱۱۲. نمای عمودی یک راکتور نیروگاه با اورانیم طبیعی، گرافیت، گاز کربنیک.

۱. دل؛ ۲. گاز کربنیک سرد (حدود  $220^{\circ}\text{C}$ )؛ ۳. مبادله‌گر دستگاه تبخیر؛ ۴. دم کوره؛ ۵. روکش از بتون پیش تنیده به ارتفاع ۵۰ متر؛ ۶. گاز کربنیک گرم (حدود  $380^{\circ}\text{C}$ )؛ ۷. مجراهای گذر سوخت، میله‌های تنظیم نمایان نیستند؛ ۸. دستگاه سوختگردانی.

وجود دارد: غلاف و کمر بند امنیتی.

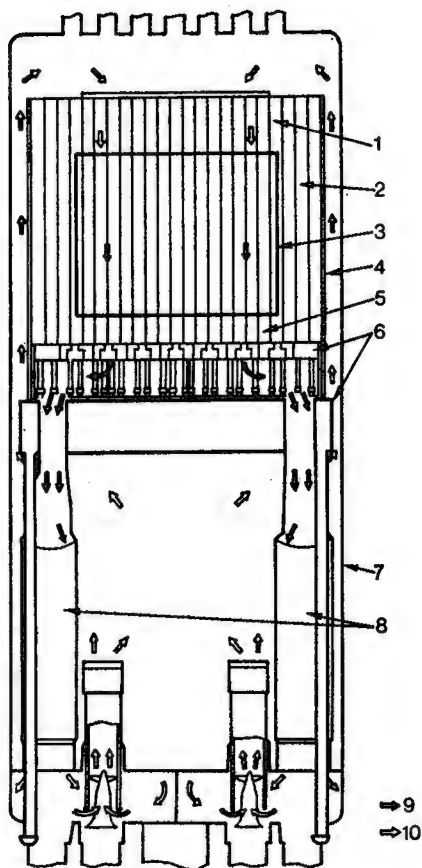
غلافها و صندوقها، علاوه بر کار آشکار خود، نقش امنیتی بسیار مهمی هم در کارخانه‌های هسته‌ای دارند که در نیروگاه‌های معمولی نیست و آن لوله‌های ردیفی و گنبدیهای بخارساز است. طبیعتاً کار آنها بستگی به کیفیت مصالح، دقت در ساخت آنها و جدیتی دارد که در کنترل تکنیکها و چگونگی تنظیم کارگذاری، ساختمان و طرز کار همه کارخانه‌های هسته‌ای و بالاخره، شرایطی دارد که در گذشته از آنها سخن رفت.

عناصر سوختی: این عناصر که در پی آزاد شدن انرژی پدید می‌آیند، از آنجا که غالباً اجزای متشکله خود دل می‌باشند اهمیت زیادی دارند. همه راکتورهای دارای ظرف فولادی و ماده کندساز (یا گرمابر) مایع: راکتورهای با آب و راکتورهای سریع با سدیم مایع در این گروه جای دارند. همچنین راکتورهای گرافیتی-گازی با دمای بالا چنین است. در این صورت، باید توجه داشت که عناصر سوختی نه تنها افراد، بلکه گروهی هم، چنین می‌باشند. تنها قطعات همیشگی دل عبارتند از به اصطلاح «دامن»هایی که دور آن را می‌پوشانند و صفحات (در کف و سقف) که عناصر سوختی را، نسبت به ظرف، در جای خود نگاه می‌دارند و در همان حال مسیر گرمابر را معین می‌کنند و اجازه می‌دهند که از سوراخهایی که در سقف یا کف وجود دارند میله‌های تنظیم و ابزارهای اندازه‌گیری عبور کنند (شکل‌های: ۱۱۳ و ۱۱۴ و ۱۱۵ و ۱۱۶).

از سوی دیگر، در راکتورهای استوانه‌ای و در انواع دیگر راکتورهای گرافیتی-گازی، عناصر سوختی در نوعی ساختار مکانیکی جای گرفته‌اند تا برای همه عمر راکتور دوام آورند (با اینکه تعمیرات اساسی، مانند تعویض لوله‌های راکتور امکانپذیر است).

این عناصر سوختی، مجزا یا با سرخوشه‌ای، کانال به کانال، معمولاً استوانه‌ای هستند. اما برعکس، آنهایی که باید به دل راکتور تکیه داده شوند مخروطی شکل می‌باشند. گرچه هر دو گروه، معمولاً به شکل دسته‌ای از مدادهای سوختی فراهم آمده‌اند (شکل‌های ۱۱۷ و ۱۱۸).

اورانیم فلزی: بنا به دلایل فیزیکی، اورانیم فلزی نخستین سوختی بود که به کار گرفته شد. چگالی بالا (۱۹ گرم برای هر سانتیمتر مکعب) و رسانایی گرمایی نسبتاً خوب سبب گزینش آن شدند. با این همه، بخوبی شناخته شده نبود. در سال ۱۹۴۱ هنوز آن را به مقدار زیاد، بخصوص در مقیاس صنعتی تولید نمی‌کردند. از دمای ذوب آن اطلاع دقیقی نداشتند (بین  $1100^{\circ}\text{C}$ ، که عدد درستی بود و  $1800^{\circ}\text{C}$ ؛ زیرا گرد موجود در آن زمان چنان اکسید شده بود که اندازه‌گیری این دما، مفهوم چندانی نداشت). مسئله آماده‌سازی آن بسیار سریع حل شد. اما مشکلات دیگری در راه

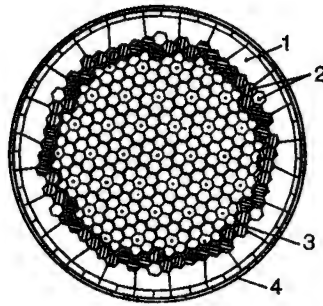


شکل ۱۱۳. رآکتور گرافیتی - هلیمی با دمای بالا، در ممالک متحده امریکا.

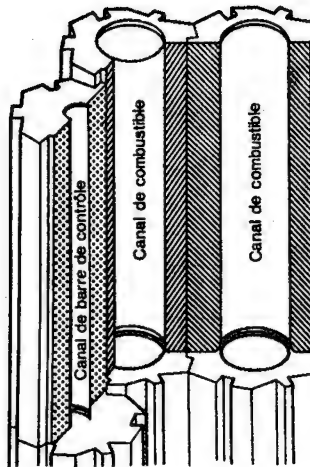
این شکل را با شکل‌های ۱۰۶ و ۱۱۲ مقایسه کنید. صندوق بتونی در این شکل نشان داده نشده است.

۱. بازتابنده بالایی؛ ۲. بازتابنده پهلویی؛ ۳. دل؛ ۴. کرسست فولادی؛ ۵. بازتابنده زیری؛ ۶. تکیه‌گاه دل؛ ۷.

زره درون صندوق؛ ۸. مبادله‌گر گرما؛ ۹. جریان هلیم گرم؛ ۱۰. جریان هلیم سرد.

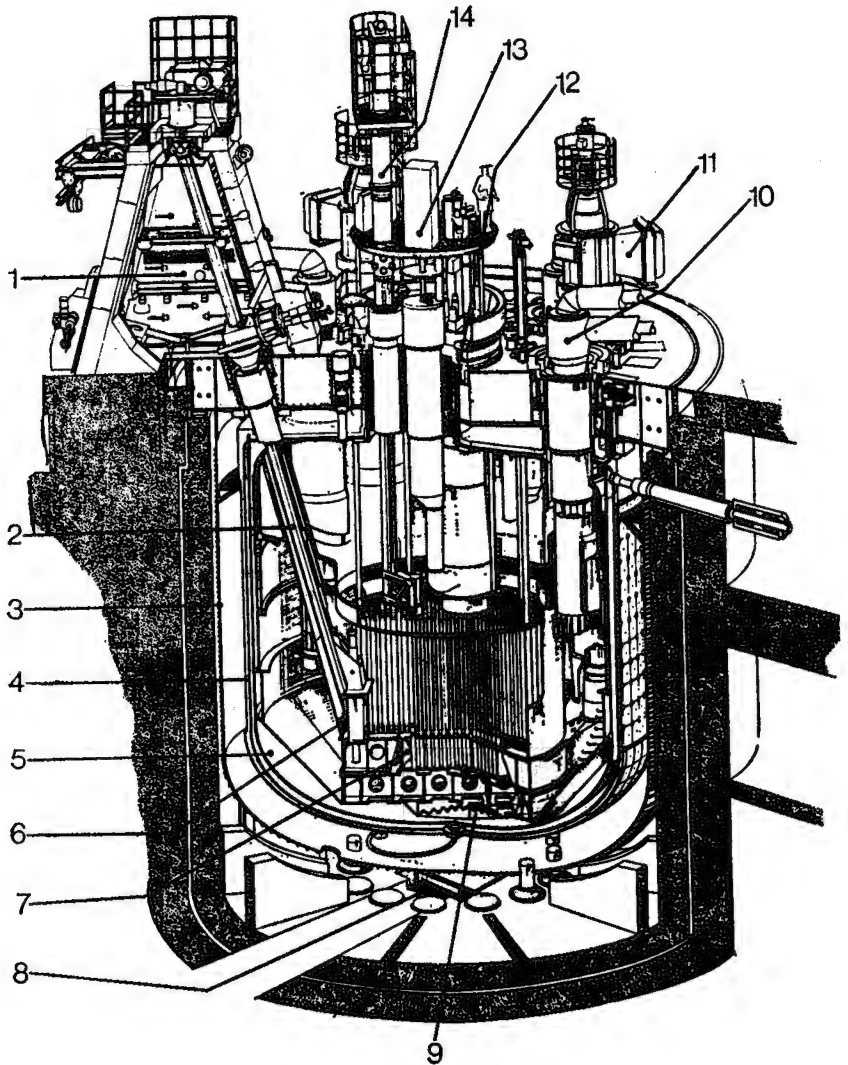


شکل ۱۱۴. رآکتور گرافیتی - هلیمی با دمای بالا، مقطع افقی دل.  
 ۱. قطعات گرافیت؛ ۲. مخروطهای گرافیتی بازتابنده؛ ۳. مرزهای دل؛ ۴. کرست فولادی.



شکل ۱۱۵. رآکتور گرافیتی - هلیمی با دمای بالا.

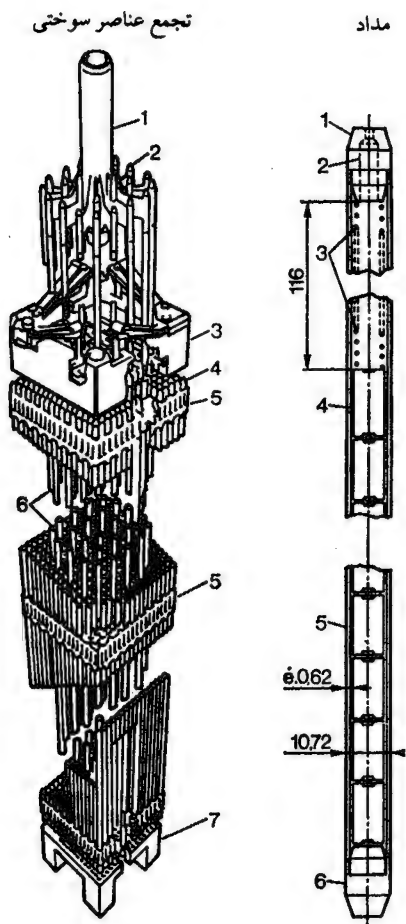
نمای تجمع قطعات گرافیت کندساز، میله‌های تنظیم یا قطعات سوختی در کانالها جاسازی شده‌اند (آنها را با فشار به شکل استوانه درآورده‌اند و حبه‌های سوخت در زمینه کربنی پخته شده‌اند).



شکل ۱۱۶. رآکتور با نوترون سریع ۲۵۰ MWé Phenix، مارکول فرانسه.

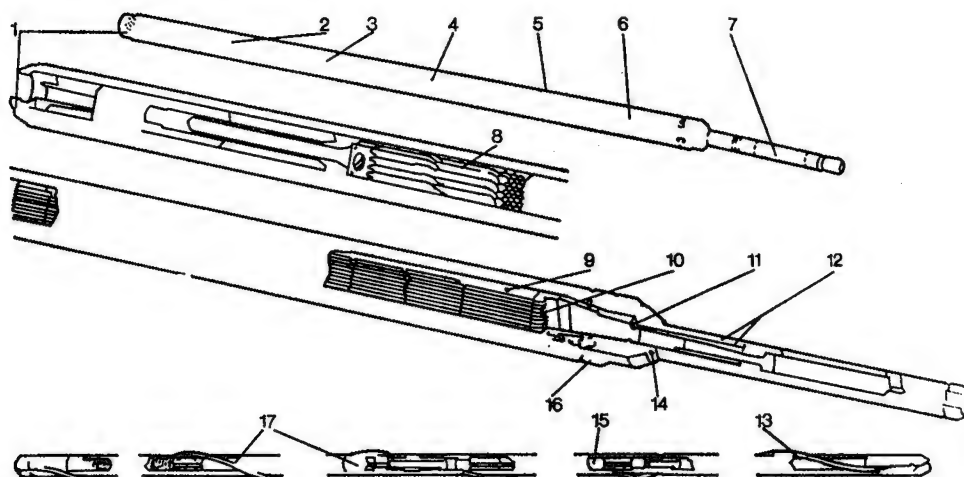
۱. سرند از عنصر سوختی؛ ۲. شیب اصلی انتقال سوخت؛ ۳. ظرف کمر بندی اول؛ ۴. لفاف دوتایی؛ ۵. ظرف فازی اصلی؛ ۶. ظرف اولیه؛ ۷. سکوی رآکتور؛ ۸. محفظه پیمانه‌های نوترونی؛ ۹. خاکستردان؛ ۱۰. مبادله گرگرم؛ ۱۱. موتور پمپ سدیم مایع؛ ۱۲. میله‌های تنظیم؛ ۱۳. بازوی انتقال دهنده عناصر سوختی.





شکل ۱۱۷. مدادهای سوختی و تجمع آنها در راکتور با آب تحت فشار.

راست: مداد. ۱. سرپوش بالایی؛ ۲. روزنه برای تزریق هلیوم؛ ۳. فنر؛ ۴. پاستیل در همجوش  $UO_2$ ؛ ۵. غلافی از آلیاژ زیر کالوی؛ ۶. محفظه انبساط. اندازه‌ها به میلیمتر می‌باشند؛ طول کلی مداد سه متر است. چپ: تجمع مدادها. ۱. ساق میله تنظیم؛ ۲. مداد جذب‌کننده؛ ۳. قطعه انتهایی بالا؛ ۴. مداد سوختی؛ ۵. پنجره؛ ۶. لوله هدایت‌کننده مداد جذب‌کننده؛ ۷. قطعه انتهایی پایین.

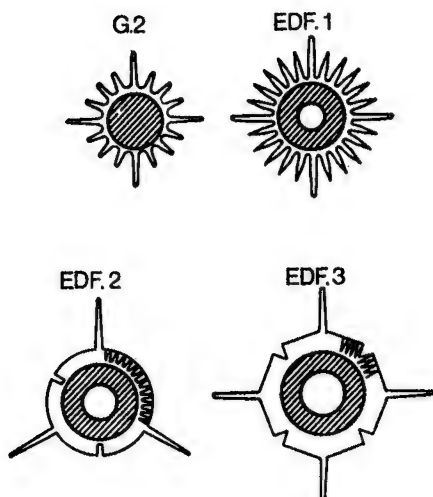


شکل ۱۱۸. تجمع عناصر سوختی در رآکتور فنیکس.

۱. قطعه گیرنده؛ ۲. حفاظ نوترونی بالا؛ ۳، ۸ و ۱۵. پوشش محوری  $UO_2$ ؛ ۴ و ۹ و ۱۷. دل ( $UO_2 + PuO_2$ )؛ ۵. لوله ششگوش؛ ۶. پوشش محوری پایین ( $UO_2$ )؛ ۷. پایه؛ ۱۰ ریل؛ ۱۱. دیافراگم برای تنظیم مقدار بده سدیم مایع؛ ۱۲. سوراخ عبور سدیم؛ ۱۳. سیم ماریپیچی برای جدا کردن مدادها؛ ۱۴. سوراخ گرد؛ ۱۶. بادامک راهنما.

بودند. از یکسو، این فلز جز در نوع پایدار موجود در دمای بالا - ناهمسانگرد (آنیزوتروپ) است؛ از سوی دیگر، همین که دما کمی بالا رود بسیار واکنش دهنده می شود. این فلز، نه تنها در تماس با گرمابرهاى معمولی (آب، گاز کربنیک) اکسید می شد بلکه با فلزات دیگر هم، بویژه با آلومینیم، که تهیه خالص و ماشین کاری آن به علت جذب کم نوترونی آن، آسان است و برای اجرای نقش غلاف، ایدآل می نماید واکنش می دهد. بالاخره اورانیم بین دماهای  $600^\circ$  و نقطه ذوب  $1080^\circ C$ ، همراه با افزایش وزن متحمل چندین تبدیل آلوتروپی می شود. این معایب، با آلیاژسازی کاهش می یابند، اما رفع نمی شوند. آلیاژسازی با عناصری انجام می گرفت که بسیار جذب کننده نوترون باشند تا کاربرد اورانیمی که از  $U^{235}$  غنی نشده بود، لااقل با دشواری هم که شده، عملی باشد.

باوجوداین، توانستند از اورانیم فلزی با غلاف آلومینیمی در رآکتورهای بزرگ اولیه پلوتونیم زای دارای گرافیت که با آب خنک می شدند استفاده کنند. این رآکتورها در حالت خنک کار می کردند

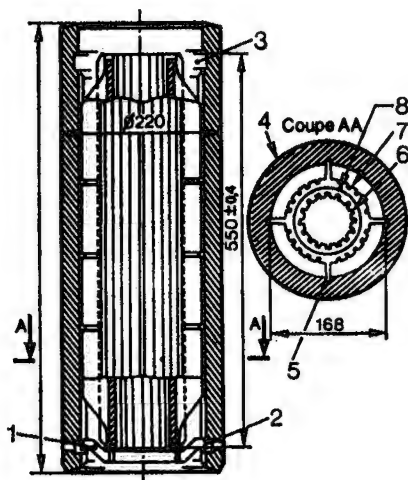


شکل ۱۱۹. تحول عناصر سوختی. رآکتورهای فرانسوی با اورانیم طبیعی - گاز کربنیک. در فاصله سالهای ۱۹۵۵ - ۱۹۷۰، میله‌های توپر اورانیمی به میله‌های توخالی تبدیل شدند. در این حالت، پره‌کاری غلاف دشوار است.

و از تولید انرژی قابل استفاده ناتوان بودند.

رآکتورهای صنعتی گرافیتی - گازی با اورانیم طبیعی، اکنون از سوختهایی استفاده می‌کنند که از یک لوله اورانیم کمی آلیاژی - تشکیل شده‌اند و مغزی از گرافیت دارند. غلاف منیزی می (دارای کمی زیرکونیم یا آلومینیم و بریلیم) پره‌ها و شیارهایی دارد که هم عنصر سوختی را در کانال دل راهنمایی می‌کند و هم در سطح تماس خود با گاز گرما بر، هیجان لازم برای انتقال گرما را فراهم می‌سازد (شکل‌های ۱۱۹ و ۱۲۰).

آب سنگین یا اورانیم غنی شده: در استفاده از آب سنگین به عنوان کندساز، یا (با) اورانیم غنی شده به عنوان ماده شکافت‌پذیر، امکان تعویض اورانیم فلزی با  $UO_2$  وجود دارد. و نیز می‌توان خاطرنشان ساخت که، از نظر تاریخی، رآکتورهای پژوهشی اولیه با آب سنگین از اورانیم فلزی استفاده می‌کردند و نیز، برعکس، بخشی از سوخت اولیه همه رآکتورها، از جمله رآکتور فرمی در شیکاگو، در دسامبر ۱۹۴۲ اکسید  $U_3O_8$  بود. در آن زمان بعضی مصالح گران‌قیمت (مانند آب



شکل ۱۲۰. وضع کنونی یک عنصر سوختی در Bugey I.

مدل این رآکتور، دارای غلافهایی بمنظور خنک‌سازی درون و بیرون آن است.

۱. زین؛ ۲. پایه؛ ۳. گلولی قطعه گیرنده؛ ۴. پوشش گرافیتی؛ ۵. پره هدایت‌کننده به گلولی؛ ۶. غلاف درونی؛ ۷. غلاف بیرونی؛ ۸. میله اورانیومی با مقطع گرد. اندازه‌ها برحسب میلیمتر است.

سنگین) بودند؛ و به علت جوان بودن این تکنولوژی، اورانیم فلزی یا  $UO_2$  در دسترس نبود. اما ناگزیر باید هرچه زودتر، رآکتورها ساخته می‌شدند. و بنابراین، می‌بایست مدل‌هایی را در نظر گیرند که از مقدار موجود به بهترین صورت استفاده شود.

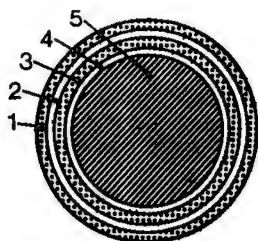
اکسید اورانیم: در سال ۱۹۶۰، اکسید  $UO_2$  در همجوش، عنصر سوختی تقریباً همه رآکتورها بود. توانستند پیش‌بینی کنند که ترکیبات دیگری مانند UC یا USi که سنگینتر و گرما رسانایی بیشتری دارد رفته‌رفته در بعضی از رآکتورهایی که هنوز به مرحله صنعتی نرسیده بودند جای  $UO_2$  را بگیرند. اما در مورد رآکتورهای با آب، معمولی یا سنگین، هیچ چیز جای  $UO_2$  را نمی‌گیرد. پس این رآکتورها بازار را به دست گرفتند و تا مدتها سلطه آنان ادامه یافت (جدول II).

اکسید  $UO_2$  با چگالی میانگین  $(U/Ig \cdot at 44)$  و رسانایی گرمایی پایین و نیز نقطه ذوب بالا ( $2600^\circ C$ )، ساختاری بلورین همسانگرد دارد اما فاقد تبدلات آلوتروپی است و واکنش‌پذیری شیمیایی آن کم است. جالب اینکه آب گرم با کندی زیاد آن را اکسید می‌کند، به طوری که یک عیب کوچک غلاف اهمیت چندانی ندارد، درحالی که مداد سوختی را بسرعت خراب می‌کند و در نتیجه

چنانچه اورانیم فلزی یا UC به‌کار رفته باشد آلودگی رادیوآکتیو در مدار اولیه، جدی خواهد بود. تهیهٔ  $UO_2$  آسان است و آن را تنها به‌شکل پاستیل‌های در همجوش با قطرهای ۷ تا ۲۰ میلیمتر و ارتفاعی مشابه، بسته به اینکه برای چه رآکتوری باشد - به‌کار می‌برند. این پاستیل‌ها را در غلاف‌ها روی هم می‌چینند تا مدادهای سوختی را تشکیل دهند و پس از اینکه در زیر فشار مختصری از هلیوم قرار داده شدند آنها را لاک و مهر می‌کنند. مدادها به دسته‌هایی  $15 \times 15$  یا  $17 \times 17$ ، مثلاً در PWR تقسیم می‌شوند. این دسته‌های مداد را در جعبه‌های کم‌ویش مشبک قرار می‌دهند و در صورت لزوم برای آلات اندازه‌گیری یا وسایل تنظیم، جایی را خالی می‌گذارند. با تجمع این جعبه‌ها، کل دل تشکیل می‌شود. از آنجا که مقدار جذب نوترون‌ها به توسط هسته‌هایی که نه شکافت‌پذیر و نه بارآور هستند در دل رآکتور حتی‌المقدور باید کم شود، غلاف‌ها و جعبه‌ها باید کمی خاصیت گیراندازی نوترون داشته باشند و، درعین حال دارای خواص مکانیکی خوب و در برابر خوردگی مادهٔ گرماب‌ر هم مقاوم باشند. مدتها این وسوسه وجود داشت که بریلیم را سازگار کنند اما، هیچ‌گاه نتوانستند آن را به‌شکل کاملاً نرم با بهای مناسب به‌دست آورند. عنصر زیرکونیم که هافنیم آن را، که با خواص مشابهی در طبیعت همراه آن است، از آن جدا کرده باشند، در برابر نوترون‌ها بسیار شفاف است و تولید صنعتی آن بمنظور انرژی هسته‌ای بوده است. این عنصر به‌شکل آلیاژهای محتوی کمی قلع، آهن و غیره بسیار آسانتر به‌کار گرفته می‌شود و بنابراین مورد استفاده است. بدون آن، ساخت رآکتورهای با آب سنگین و اکسید طبیعی اورانیم، میسر نبود. از آن، لوله‌های خنک‌کننده تحت فشار، غلاف‌ها، صفحات تجمع دسته‌های مداد را ساخته‌اند. اما در دل رآکتورهای با آب معمولی، آلیاژهای زیر کالوی را با احتیاط تمام جانشین فولادهای زنگ‌ناپذیر کردند؛ درحالی‌که سازندگان و استفاده‌کنندگان از این نوع رآکتورها، غنی سازی رشدیابنده سوخت را با  $U^{235}$  به‌علت خاصیت اکسید ناشدنی آن پذیرفته‌اند. در مورد رآکتورهای با نوترونهای سریع می‌توان از مدادهای  $UO_2$  با غلاف‌هایی از فولاد زنگ‌ناپذیر استفاده کرد.

میکروسفرولها برای رآکتورهای با دمای بالا: رآکتورهای با دمای بالا که گرافیت، کندساز و هلیوم، خنک‌کننده آنهاست (زیرا در دمای بالا خود  $CO_2$  همراه با  $CO$  یا  $CH_4$  گرافیت را می‌خورد)، از  $UO_2$  به‌شکل خاصی استفاده می‌کنند که آن را میکروسفرول می‌نامند؛ زیرا قطر آنها چند صد میکرون است.

این سفرولها که به روش بستر سیال آسان به‌دست می‌آیند، با روشهای مشابهی، با لایه‌های پشت سر هم پیروکربن با بافتهای مختلف لفاف می‌شوند و گاهی هم لایه‌ای از SiC در میان آنها



شکل ۱۲۱. مقطع یک گویچه سوختی.

۱. پیرو کربن با چگالی زیاد؛ ۲. کربید سیلیسیم؛ ۳. پیرو کربن با چگالی زیاد؛ ۴. پیرو کربن پوک و لایه نفوذناپذیر؛ ۵. سفرول  $UO_2$  در همجوش (قطر کلی چند میلیمتر).

وارد می‌کنند. «ذرات لفاف شده» متراکم در خمیر گرافیت، بعداً گرافیتی شده و در قطعات گرافیتی تشکیل‌دهنده دل راکتور، وارد می‌شوند (شکل ۱۲۱). دو نوع از آن، یکی با ساختمان مخروطی صلب و دیگری به شکل گویچه‌های گردان مورد آزمایش قرار گرفتند. هر دو نوع آنها بتدریج صنعتی شدند.

در این جا، پوسته‌های پشت سر هم که روی گویچه‌ها نشسته‌اند، غلاف را می‌سازند. و فرایند تراکم و گرافیت شدن آن را تقویت می‌کنند. این روش، کارایی بسیار از خود نشان داد. ذرات لفاف شده بدون اینکه امکان فرار از فراورده‌های شکافت را داشته باشند تابشهای شدیدی را تحمل می‌کنند و نسبت به ضربه‌های گرما هم حساس نیستند. با این روش، آرایشی نسبتاً همگن، در مقیاس مسافتهای آزاد نوترون‌ها، سوخت و کندساز ایجاد می‌شود، چیزی که برای تشکیل پلوتونیم مساعد است. راکتورها با به‌کارگرفتن چنین سوختهایی و مصرف، مثلاً  $U^{235}$  و تولید نسبتاً فراوان  $PU$  یا  $U^{233}$ ، می‌بایست «تبدیلگر»های خوبی برای ماده شکافت‌پذیر باشند.

این نمونه خوبی، اگر برای تحول تکنیکها نباشد، لااقل برای تحول مفاهیم در مسیر پیشرفت یک تکنیک است. از سال ۱۹۴۵ رغبت به راکتورهای دارای دمای بالا بتدریج زیاد شد. رشته اندیشه‌ها ساده بود. شکافت هسته، به‌دست آمدن گرمای با دمای بسیار بالا را، اصولاً ممکن می‌سازد. از این واقعیت، به‌علت محدودیتهای مربوط به خصوصیت‌های مواد (دمای ذوب، پایداری ترمومکانیکی، خوردگی، گیراندازی نوترون‌ها و غیره)، که اورانیم فلزی یا غلانه‌های متالیک با آنها سروکار دارند، استفاده نمی‌شد. بنابراین، ناچار در پی یافتن راکتورهای «کاملاً نسوز» برآمدند. ماده کندساز می‌تواند گلو سین (برلییم) یا گرافیت باشد؛ ماده سوختی می‌تواند یک اکسید یا یک کربید



اورانیم باشد که غلافی از گرافیت دارد و ماده گرمابر، هلیمی است که از نظر شیمیایی خنثی است. بریلیم به کناری گذاشته شد (بهای گراف و دشواری تولید) و گرافیت ماند. اما در سالهای ۱۹۵۰-۱۹۵۵ گرافیت هسته‌ای صنعتی پوک بود. بنابراین می‌بایست یک آلایش مهم مدار اولیه بوسیله فرآورده‌های شکافتی را پذیرفت. این فرآورده‌ها بدون دشواری زیاد، از هلیم جدا می‌شوند و با ناپدید شدن از دل رآکتور، نوترون‌ها را گیر نمی‌اندازند. چنین وضعی ضریب تبدیل  $U_{238}$  به  $Pu_{239}$  را بهتر خواهد کرد و به عمر سوخت در هسته خواهد افزود. مبانی طرح چنین رآکتوری بنابراین چنین است: عنصر سوختی که برای بیرون کردن فرآورده‌های شکافتی می‌کوشد؛ یک مدار اولیه بسیار آلوده، که سیستم پیشرفته‌ای برای خالص‌سازی هلیم لازم دارد؛ یک مبادله‌گر، که مانع هرگونه نشت رادیوآکتیو، در مدار ثانوی شود. در جریان پیاده کردن طرحها، این مبانی بکلی واژگون شدند و معلوم شد که اصول نقشه ماشینها اختراع ذرات لفاف شده و نیز اختراع گرافیتها صنعتی غیر پوک، که بیش از همه مرهون صنعت فضاوردی است را می‌توان با آن سازش داد و با نگاهداری کامل فرآورده‌های شکافت و به حساب کاهش ضریب تبدیل، رآکتورهایی ساخته شد که مدار اولیه آنها خلوص فوق‌العاده‌ای دارد. به این ترتیب، در گذر از رآکتورهای نمایشی به مدل‌های صنعتی توانستند هم مبادله‌گر را بسیار سبک و ساده کنند و هم خالص‌کننده‌های مدار اولیه را.

خلوص مواد: اهمیت خلوص مواد نیز در رشته هسته‌ای دست‌خوش دگرگونیهای فراوانی بوده است. در آغاز، زمانی که تنها با سیستمهایی با مقدار رآکتیویته کم سروکار داشتند یا حتی آن‌گاه که از وجود واکنش زنجیری بی‌خبر بودند، بهتر می‌دانستند که از موادی استفاده کنند که قدرت جذب نوترونی انگل آنها هرچه کمتر باشد. این اقتضای جدید، همراه با گوناگونی فراوان گیراندازی نوترون‌ها بوسیله نوکلیدهای مختلف سبب شد که عناصری که غالباً زیاد شناخته شده نبودند یا شیمی دشواری داشتند، از قبیل خاکهای کمیاب یا بور، اهمیت یابند. می‌بایست بتوان آنها را حذف کرد. و نخست آنها را اندازه‌گرفت. و مقدار آنها را به کمتر از  $5-10\%$  یا  $6-10\%$  کاهش داد، کاری که در نمونه‌های مربوط به اندازه‌گیری دقیق جرم اتمی انجام نمی‌گیرد، اما در تولید جاری روی صدها تن مواد باید رعایت شود. بسیار ساده و سریع نتیجه گرفته شد که می‌توان آن را پیشگویی کرد و بدین ترتیب، قدرت روشهای شیمیایی یا فیزیکی شیمیایی فزونی گرفت، رشته‌هایی که در آن زمان پیشگام بودند (تکنیکهای میکروشیمیایی، استخراج به کمک حلالهای آلی، تبادل یونی)، و از آن پس عمومیت یافتند.

امکان به‌کارگرفتن سوخته‌های غنی، سبب شد که کار ارز یابی جذبه‌های نوترونی انگل، گسترش



بسیار باید. این کار سبب شد که هزینه مربوط به تکمیل تکنیکهای دیگر را ارزش غنی‌سازی جبران کند. «خلوص هسته‌ای» از مرتبه لزوم مطلق به مرتبه عنصر ساده‌ای از یک سازش فنی - اقتصادی سقوط کرد. اما با شکلهای دیگری باز به صحنه آمد، مثلاً همراه با آلودگی رادیوآکتیو یا با خواص مواد؛ و ما به ارائه چند مثال اکتفا می‌کنیم. عنصر کبالت معمولاً در کانیهای آن با نیکل همراه است و در مرحله آماده‌سازی متالورژیکی آن، مقدار کبالت زیاد است. تحت تأثیر نوترونها، کبالت یک ایزوتوپ ( $^{60}\text{Co}$ ) با نیم عمر بسیار طولانی (پنج سال) می‌دهد و در ضمن تابش گامای نافذی دارد. بنابراین، در برخی کاربردهای هسته‌ای، صرفه در به‌کار گرفتن نیکلی است که مقدار کبالت آن بسیار کمتر از مقدار نیکل معمولی باشد. در نیروگاههای هسته‌ای باید با کمال دقت از خوردنگی جلوگیری کرد. در واقع از یک‌سوی غلافهای مدادهای سوختی، که اهمیت حیاتی آنها نموده شد برای بهتر شدن تراز نوترونی بسیار نازک هستند و از سوی دیگر، فرآورده‌های خوردگی در سراسر مدار اولیه نفوذ می‌کنند و با رادیوآکتیویته خود سبب می‌شوند که عملیات نگاه‌داری یا تعمیر، که اساساً بسیار ساده هستند بسیار دشوار گردند. این امر به مشکلات شیمیایی بسیار جدی، چه درباره فلزات ساختمان رآکتور (فولادهای با درصد بسیار کم کربن، کمتر در معرض خوردگی هستند)، چه برای آب منجر خواهد شد. درباره آب باید گفت که مقدار کلر نباید از  $10^{-6}$  بیشتر باشد تا خوردنگی بین ذره‌ای فولادهای زنگ‌ناپذیر یا هیدرید شدن زیرکونیم اتفاق نیافتد. می‌بایست به همان دلایل مقدار pH را بدقت کنترل کرد. تجزیه رادیولیتیک آب با درصد کلی ناخالصیها نسبت مستقیم دارد.

تأثیر تابشها: این تأثیر روی مواد، در صنعت هسته‌ای، مشکلی تازه و بسیار جدی است. این تابشها در رآکتورها و در کارخانه‌های هسته‌ای، فوتونها (تابشهای X و تابشهای  $\gamma$ ) و تابشهای ویژه (الکترونها و نوترونها) هستند. آنها در ماده‌ای که از آن گذر می‌کنند آثار گوناگون و غالباً همزمان را سبب می‌شوند:

آثار هسته‌ای: شکافت و گیراندازی نوترونی، برای نوترونها. واکنشهای فوتوهسته‌ای برای تابشهای  $\gamma$  دارای انرژی زیاد (در موارد مورد بررسی ما، این واکنشها در برابر واکنشهای مربوط به نوترونها قابل توجه نیستند)؛

آثار فیزیکی - شیمیایی: واکنشهای شیمیایی که اساساً در اثر تابشهای  $\beta$  و  $\gamma$  ایجاد می‌شوند (مثلاً رادیولیز آب، پولیمریزاسیون مواد خنک‌کننده آلی، غیره). غالباً این فرایندها را با تعداد G مولکولهای درهم شکسته (یا تشکیل شده) در هر  $10^6 \text{ eV}$  انرژی جذب شده تخمین می‌زنند. تشکیل یک جفت (یون + الکترون) غالباً متضمن حدود  $30 \text{ eV}$  می‌باشد. تعداد G بسیار تغییرپذیر

است و عده ۱/۰ تا ۵ اکثریت دارد؛

آثار جهشها، که واکنشهای هسته‌ای:  $(n, \gamma)$ ، سپس رادیواکتیو،  $(n, \alpha)$ ،  $(n, p)$ ،  $(n, f)$  را در ماده عناصری که قبلاً نبودند وارد می‌کنند؛

آثار تغییر ساختارهای بلورین، اکثراً بوسیله ضربات نوترونهای سریع و پاره‌های شکافتی، که اتمها را از مواضع تعادلی خود در شبکه‌های بلورین جابه‌جا می‌کند (اترویگنر)<sup>۱</sup> الکترونهای اولیه (تابشهای  $\beta$ ) و ثانوی (الکترونیایی که تابشهای  $\gamma$  آنها را جابه‌جا کرده است)، مقدار کمی از این تأثیر را دارند.

مشکل فراورده‌های شکافت: در سوخته‌های هسته‌ای، شکافت به‌جای یک اتم  $U$  دو اتم از فراورده‌های شکافتی ایجاد می‌کند که تابشهای یونی آنها، به‌طور متوسط، بالاتر از تابشهای  $U$  هستند. در همان حال یک اتم  $U$  تقریباً به پلوتونیم تبدیل شده است.

به‌عنوان نمونه، سوخته‌های رآکتورهای با آب حدود  $20000 \text{ MWJ/t}$  تولید می‌کنند که مربوط به شکافت ۲٪ اورانیم اولیه (یا  $U + Pu$ ) می‌شود. در آزمایش حدود پنج برابر این مقدار به‌دست آمده است و امید می‌رود که در رآکتورهای یا نوترون‌ها سریع این درصد به‌طور صنعتی به‌دست آید. در این حال حال، برای ۱۰۰ اتم اولیه، در پایان از آن ۱۲۰ خواهند داشت که از نظر شیمیایی ۳۰ عدد با رقم ۱۰۰ اولیه اختلاف دارد!

چنانچه تفاوت فراورده‌های شکافتی ( $30\%$  تایی عنصر) را به‌حساب آورند دیده می‌شود که سوخت هسته‌ای، کمی پس از آغاز شدن کارش، بکلی چیز دیگری شده است. حتی چنانچه همه فراورده‌های جدیدی که تشکیل شده‌اند بتوانند در حالت محلول جامد بمانند، باز همه خواص آنها محسوساً تغییر خواهند یافت و معلوم است که تا چه اندازه فلزها و سرامیکها در برابر ناخالصیها، حساس هستند. بخصوص ۲٪ (اتمی) از فراورده‌های شکافتی، از گازهای کمیاب هستند که حلالیت آنها در  $U$  یا  $UO_2$  صفر است. بنابراین، آنها از فلز یا از سرامیک فرار می‌کنند، بخشی اتم به اتم نفوذ می‌کنند و نیز پیش از اینکه به سطح برسند گویچه‌هایی تشکیل می‌دهند.

وانگهی فراورده‌های شکافتی، به‌شکل انرژی جنبشی، ۸۳٪ انرژی شکافتی را با خود می‌برند. این انرژی به‌شکل گرما، از طریق تصادم با اتمهای مجاور، در طول مسیر بسیار کوتاه، حدود ۱/۰ میلی‌متر، از بین می‌رود. اتمهای مورد تصادم از مواضع تعادلی خود خارج می‌شوند ( $10^4$  تا  $10^8$  در هر شکافت، زیرا این فراورده‌ها  $160 \text{ MeV}$  را با خود می‌برند و انرژی ارتباط شبکه‌ای حدود

۱. Wigner یوجین پاول ۱۹۰۲ - فیزیکدان آمریکایی متولد مجارستان، که در سال ۱۹۳۰ به آمریکا آمد و در ۱۹۶۳ همراه با م. مایر و ه. نینن موفق به دریافت جایزه نوبل شد. - م.

چند eV بیش نیست). بسیاری از آنها فرو می‌افتند، زیرا در این به اصطلاح «داغ‌زدگی» که خط سیر یک پاره شکافتی ایجاد کرده است می‌توان ادعا کرد که جسم اگر نه تبخیر شده باشد، به حالت مایع درآمده است و در شرایطی که می‌توان در تشبیه با عملیات جاری، سرد کردن و باز پخت همزمان؛ توصیف شود به حالت جامد باز می‌گردد. با این همه تعداد جابه‌جایی می‌ماند که آنها را ۱۰۰۰ عدد در هر شکافت تخمین می‌زنند.

بدین ترتیب آسان می‌توان فهمید که مواد سوختی طی اقامت خود در رآکتور، حتی بدون الزامات ترمودینامیکی ناشی از ساخت آنها در سرما و کاربرد آنها در گرما و ضربات گرمایی ناشی از وقفه‌ها و به‌کار افتادهای مکرر ماشین، تغییر شکل‌های فراوان دارند.

تغییر شکل‌های اورانیم: اورانیم فلزی بخصوص به علت ناهمسانگردی (آیزوتروپی) فاز  $\alpha$  راست‌گوشه (ارتورومبیک) آن، که در دمای پایینتر از  $665^{\circ}\text{C}$  درجه پایدار است و نیز استحکام مکانیکی کمی که دارد آماده تغییر شکل است. این اورانیم در دمای پایینتر از  $450^{\circ}\text{C}$  بدون اینکه چگالی آن تغییر کند تغییر شکل می‌دهد. در بالاتر از این دما، چگالی آن کم می‌شود و نوعی تورم در آن پدید می‌آید که اصولاً مربوط به تشکیل گویچه‌های فراورده‌های شکافت گازی است. گرما رسانایی آن در هنگام تابش کاهش می‌یابد و این امر چگالی توان مجاز را پایین می‌آورد زیرا دمای بیشینه، اکیداً محدود شده است.

این معایب بسیار جدی - اگر نگوئیم منتفی‌کننده - را می‌توان از دو راه کاهش داد. تصرفات گرمایی (سرد کردن سریع در دمایی که فلز در فاز  $\beta$  یا  $\gamma$  است) و عملیات مکانیکی (چکشکاری) که ساختاری با دانه‌های بسیار ریز با جهتگیریهایی تصادفی بدان می‌بخشد و در مقابل، نوعی شبه همسانگرد (ایزوتروپی) ایجاد می‌کند. اضافه کردن عناصر آلیازی (Nb, Mo, Zr, Cr) این ساختار ظریف‌دانه را پایدار می‌سازد. حتی اگر نسبت این مواد اضافی را بالا برند، منطقه وجود فاز  $\gamma$  تا دمای معمولی هم همسانگرد باقی می‌ماند. در همان حال پایداری آن در برابر آب بیشتر می‌شود. اما همه این عناصر آلیازی (جز Zr که چندان مؤثر نیست) نوترون‌ها را بشدت گیر می‌اندازند و چگالی را پایین می‌آورند.

تمام اینها موجب محدودیت جدی تابش کلی می‌شوند که می‌توانند عناصر سوختی با پایه اورانیم فلزی را تحمل کنند و کنار گذاشتن این سوخت و همراه با آن، خانواده رآکتورهای گرافیتی - گازی با اورانیم طبیعی را به مقدار زیادی توجیه می‌کند.

مزایای اکسید اورانیم: این اکسید، بسیار پایدار است. از یکسوی همسانگرد است و ازسوی دیگر، زمانی که از راه همجوشی بدان شکل بدهند دارای تخلخل می‌شود و به فرآورده‌های شکافت اجازه می‌دهد؛ لاقلاً تا حدی، بدون اینکه تغییر شکل‌های زیادی تحمل کنند جایی داشته باشند. باین حال، این خلل و فرج باقی مانده حدودی دارند. از یکسوی کم شدن تعداد اتم‌های U در واحد حجم از میزان رآکتیویته می‌کاهد، یا در مقابل، جرم سوخت لازم را افزایش می‌دهد. ازسوی دیگر، به اصطلاح «داغ‌زدگی» شکافتی، ایجاد گداز موضعی می‌کند یا لاقلاً نوعی پیوستگی در همجوشی؛ و در نتیجه پاستیل‌های  $UO_2$  چگالتز، و سرانجام در غلاف‌های خود «شناور» خواهند شد. این امر، و نیز آزاد شدن گازهای شکافتی سبب می‌شوند که پایداری گرمایی بین سوخت و غلاف بالا رود. و نیز ممکن است فضا‌های بدون سوختی در غلاف پدید آیند که چنان طویل باشند که این مجموعه را از نظر مکانیکی سست کنند و در اطراف خود شاره نوترون را افزایش دهند که آن نیز بنوبه خود موجب داغ‌زدگی‌های نامطلوب است.

با این همه، اکسید اورانیم با داشتن دقیقاً ترکیب  $UO_2$  اگر بخوبی در همجوش شده باشد ورود تابشها را بدون اینکه ابعاد آن تغییر مزاحمی یابد، تحمل می‌کند. (شبکه بلورین می‌تواند تغییر جزئی در ترکیب خود را تحمل کند؛ اما چون  $UO_2$  بسیار اکسیدشونده است باید مراقبت شود تا بیش از مقدار لازم اکسیژن به خود نگیرد. نرخ احتراق، معمولاً با  $UO_2$  در همجوش،  $25000 \text{ MWJ/t}$  در رآکتورهای با آب به دست می‌آید و با مخلوط  $PuO_2$  و  $UO_2$  در رآکتورهای با نوترونهای سریع مقدار  $100000 \text{ MWJ/t}$  از  $10\%$  (بیش از  $10\%$  شکافت) هم می‌گذرد.

در اثر دمای بالای نیروگاهها و تابشها،  $UO_2$  متبلور می‌شود. احتمال می‌رود که یک خلأ محوری هم پدید آید. ترکها و خللهایی ایجاد می‌شوند و گرما رسانایی کاهش می‌یابد. اما مدادهای غلاف دار  $UO_2$  کاملاً سالم باقی می‌مانند. گازهای شکافتی در حجم مرده‌ای که برای آنها در نظر گرفته شده بود جای می‌گیرند و با وجود حضور آنها، کار پر کردن با هلیوم تحت فشار، تبادل گرمایی خوبی را با غلافها حفظ خواهد کرد. برای سوختهایی که نرخ احتراق بسیار بالایی ( $10^5 \text{ MWJ/t}$ ) از آنها انتظار می‌رود مدلهایی در نظر گرفته و آزمایش نیز شده‌اند که به گازهای شکافتی، امکان فرار پیوسته را می‌دهند. در چنین شرایطی از مزایای پر کردن با هلیوم بی‌بهره می‌مانند و حضور گازهای رادیوآکتیو در رآکتور ناگزیر می‌شود.

بدین ترتیب، سوخت‌های از نوع  $UO_2$  تقریباً در همه نوع رآکتور صنعتی - جز رآکتورهای با گرافیت و اورانیم طبیعی، که در آنها چگالی کم  $UO_2$  امکان کاربرد آنها را به علت بحرانی بودن در

دمای بالا منتفی می‌سازد. مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای سرمتهایی ( $UO_2$ ) بسیار غنی که در زمینه‌ای از آلومینیم یا فولاد پراکنده است) که در برخی رآکتورهای پژوهشی یا رآکتورهای کشتی به‌کار رفته‌اند در عمل هیچ مشکلی دیده نشده است.

همه آنچه گفته آمد در مورد سوختهایی که از  $PuO_2$  در همجوش یا مخلوط  $UO_2 - PuO_2$  تشکیل شده‌اند و نیز برای عناصر بارآور با مبنای  $ThO_2$  صادق است.

کاربرد کربید: پایداری زیر تابش کربید UC از پایداری اکسید آن هم بهتر است و این وضع تابش بسیار قوی را ممکن می‌سازد. اما این سوخت، که فرآورده گران است و در برابر آب، راکتیو می‌باشد در رآکتورهای با آب قابل استفاده نیست. این سوخت به احتمال زیاد در رآکتورهای با نوترونهای سریع و رآکتورهای دارای دمای بسیار بالا کاربرد دارد. سوختهایی مذاب از جنبه بزرگی یا استحکام مکانیکی مشکلی ندارند. خرابی شیمیایی آنها در اثر تابش، کم است و در صورت نیاز آنها را می‌توان بیرون از رآکتور پیوسته به حالت نخست درآورد.

استحکام مواد غلافی: مواد سازنده غلاف طبیعتاً تحت تأثیر ضربات نوترون‌ها قرار می‌گیرند و نیز مستعد گیراندازی نوترون، در بازگشت همراه با تابش  $\gamma$  هستند. آنها همچنین در معرض برخورد با تکه‌های شکافتی فراری از سطح سوخت، می‌باشند. رویهم‌رفته، زیانهای وارد بر آنها بسیار کمتر از آن است که سوخته‌ها متحمل می‌شوند، در مدتی که در رآکتورهای با نوترونهای گرمایی هستند نه از شکل می‌افتند و نه استحکام مکانیکی آنها کم می‌شود. اما در رآکتورهای با نوترونهای سریع، غلافهای عناصر سوختی متحمل شاریدگی (Fluence) بسیار زیادتر از رآکتورهای گرمایی می‌شوند و نوترونهایی که با آنها برخورد می‌کنند بیشتر هستند و میانگین انرژی آنها آشکارا بالاتر است. به دنبال از شکل افتادن، شبکه بلور در اثر برخورد نوترونهای سریع، تأثیر واکنشهای هسته‌ای  $(n, p)$  و  $(n, \alpha)$  بدان اضافه می‌شود، واکنشهایی که معلول نوترونهایی است که انرژی آنها فراتر از آستانه واکنشهای مورد نظر است. در نتیجه این واکنشها اتمهای H و He پدید می‌آیند، این اتمها، پخش و به شکل گلوله‌های گازی جمع می‌شوند. این گلوله‌ها در اثر نفوذ تهیج‌هایی که به دنبال جابه‌جایی اتمها در شبکه - در اثر برخورد نوترونها - پدید آمده‌اند، بزرگ شده‌اند. نتیجه این واکنشها همانا تورم و شکسته شدن فلز است. این پدیده‌های پیچیده، که هنوز کاملاً شناخته نشده‌اند به نوع و حالت فلز و نیز دمای کار وابسته می‌باشند. مثلاً در مورد فولادهای زنگ‌ناپذیر، مقدار تورم در پایینتر از  $350^\circ$  و بالاتر از  $800^\circ$  درجه، صفر است درحالی‌که در دماهای کار رآکتورها ( $500^\circ$  تا

۶۰۰ درجه) حداکثر. مقدار تورم همراه با شاریدگی، شتاب می‌گیرد و در مرز حدود ۱۲٪ توقف می‌کند. مقدار تورم در شاریدگیهای متناسب با مدت طبیعی اقامت سوخت در رآکتور ممکن است به ۷ تا ۸٪ برسد. چنین می‌نماید که با روشهایی از فلزگری مبتنی بر افزایش چند عنصر آلیاژی و نیز با عملیات گرما مکانیکی، که بافت ویژه‌ای در فلز ایجاد می‌کند، می‌توان این مشکل جدی را برطرف ساخت.

... و فلزات ظرف رآکتور: همین پدیده‌های بنیادین در فلزاتی که نقش سازنده رآکتور را دارند (مثلاً و پیش از همه، در فلزاتی که ظرف رآکتور از آنها ساخته می‌شوند) ایجاد می‌شوند، اما تظاهرات گوناگون دیگری دارند. در واقع، شاره نوترونی که ظرفهای رآکتور در معرض آن هستند بسیار کمتر از شاره‌ای است که غلافها تحمل می‌کنند و مقدار نوترون سریع آن شاره نیز کمتر است. دمای آن پایینتر و ضخامت زیاد آن، اثرهای اشعه  $\gamma$  را نسبت به اثرهای نوترونها مهمتر می‌سازد. اما این ظرفها باید در طول زندگی رآکتور (سی سال یا بیشتر) به آن خدمت کنند و حال آنکه غلافها مدت بسیار کمتری پایدار خواهند بود (و تعویض یک سوخت ناقص آسان است). رویهمرفته مقدار تحمل شاریدگی یک ظرف و یک غلاف می‌بایست در یک ردیف باشند. به‌طور کلی می‌توان گفت که تأثیر تابش، فلز را سخت‌تر و شکننده می‌کند (این صفات را بیشتر به معنای متداول آن آورده‌ایم تا جنبه علمی دقیق آنها). بویژه دمای تبدل از گسیختگی شکننده به گسیختگی نرم بالا می‌رود، درحالی‌که تحمل ضربه‌های گرمایی پایین می‌آید. بدین علت، بیم از آن است که چنانچه به‌هنگام وقفه‌های کار رآکتور، یک شوک گرمایی شدید در جنب یک نقص شبکه باشد ظرف درهم شکند.

حساسیت ظرفها در موارد زیر کم می‌شود:

انتخاب نوع بهتر فولاد؛

کاهش زیاد ناخالصیهای شکننده (گوگرد، فسفر)؛

به‌کارگرفتن مفتول خوب برای جوشکاری؛

تاب دادن ظرف پس از ساخته شدن، در دمایی بالاتر از دمای کار؛

بالا نگاه‌داشتن هرچه بیشتر دمای کار.

ظرف را به روشهای غیرمخرب، منظمآ آزمایش می‌کنند و نیز در رآکتور پهلوی ظرف، نمونه‌هایی از همان فلز را می‌گذارند و از هر دریچه رآکتور، تعدادی از این نمونه‌ها را بیرون می‌کشند و انواع آزمایشهای رایج را روی آنها به‌عمل می‌آورند.

تأثیر تابش روی گرافیت: گرافیت از میان کندسازهای جامد، از نظر صنعتی از همه مهمتر است گرچه خواص فیزیکی و مکانیکی آن در اثر تابش زیان می‌بیند (رسانایی گرما و برق و نیز حالت کشسانی آن پایین می‌آید). جابه‌جایی اتمها (صدها اتم برای مصرف هر MeV انرژی نوترونی) به تراکم تشعشع تغییر شکل دهنده در جامد می‌انجامد، که بخش مهمی از آن، همین‌که دمای فراورده تابش دیده به اندازه معینی رسید، یکباره آزاد می‌شود و از این‌روی خطر نوعی گرم شدن کنترل‌ناپذیر وجود دارد؛ زیرا مقدار انرژی متراکم در هر گرم به‌آسانی می‌تواند به ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر مقدار گرمای ویژه برسد.

با این حال آزاد شدن انرژی نشان می‌دهد که اتمهای جابه‌جا شده اکثراً مکان ثابتی به دست خواهند آورد که لزوماً مکان نخستین آنها نیست. امکان اصلاح خواص مربوط به جابه‌جایی اتمها در نتیجه این وضع کاهش می‌یابد؛ گرچه بکلی از بین نمی‌رود.

بدین ترتیب، فهمیده می‌شود که زیانهای مربوط به تابش در گرافیت برای رآکتورهای با گرافیت که در حدود دمای معمولی کار می‌کنند (رآکتورهای اولیه پلوتونیومی که با آب یا هوا خنک می‌شوند، و نیز رآکتورهای اولیه پژوهشی که با هوا خنک می‌شوند) بسیار مهم است (حتی در سال ۱۹۵۷ جادنه آفرید)، درحالی‌که برای رآکتورهای قدرت (رآکتور هسته‌ای زیردریاییها، هواپیماها، کشتیها - م) بالاتر از درجه‌ای است که بیشتر نارسایی‌ها را درمان می‌کند اهمیتی ندارد. با این وجود، بعضی آثار آن در دماهای بسیار بالاتر از دمای کار رآکتورها باقی می‌مانند.

این قضیه تغییر اندازه‌هاست. این تغییرات بازتاب تغییر شکل خرده بلورهاست: سطوح هشت وجهی، برای اینکه اتمهای درون شبکه‌ای جایگیر شوند از یکدیگر جدا می‌شوند، و در خود این سطوح، شبکه واحد بلور، کمی فشرده می‌شود (حدود ده بار کمتر از مقدار افزایش جدایی سطوح از یکدیگر). بدین ترتیب، ناهمسانگردی گرافیت آشکارا در تورم خرده بلورها بازتاب دارد. اما گرافیت هسته‌ای از اینکه کاملاً متبلور شود بسیار دور است. و به‌طور کلی، مانند مورد فلزات، تشعشع دو اثر متقابل دارد: در دماهای کم یا متوسط (کمتر از ۴۰۰ درجه) ترتیب موجود را به هم می‌زند و نوعی «تبلورزدایی» می‌کند (حجم افزایش می‌یابد). در دمای بالا (بیشتر از ۶۰۰ درجه) جریان عکس انجام می‌گیرد، زیرا چنانچه تشعشع گرافیتی شدن را تشویق کند: چگالی افزایش می‌یابد و جسم فشرده می‌شود. میزان این تغییرات نسبی ممکن است به ۱٪ و حتی بیشتر برسد.

بنابراین طرز آکندگی گرافیت، که ساختمان راکتورها را تشکیل می‌دهند باید طوری باشد که به این تغییرات اندازه‌ها و تغییراتی را که در اثر انبساط گرمایی ایجاد می‌شوند امکان دهد، بدون اینکه از ثبات مجموعه یا ردیف بودن کانالهای مخصوص مانور جهت پر کردن و تخلیه سوختها مایه بگذارد. این شرایط با جابه‌جا کردن بسیار حساب شده مغلولهای گرافیت، که با خارهایی به یکدیگر اتصال دارند، حاصل می‌شود و حال آنکه مجموعه گرافینهای کار گذاشته شده را تسمه‌هایی از فولاد فزدار نگاه می‌دارند. کاربرد لفافه‌هایی از گرافیت ثابت همراه با عناصر سوختی، کار را تسهیل می‌کند. در واقع شاره نوترونهای سریع که در جوار مواد سوختی حداکثر می‌باشد بتدریج که در گرافیت، که کندساز خوبی است، فرو می‌رود کم می‌شود. بنابراین، شدیدترین شوکها را لفافهای ثابت گرافیتی تحمل می‌کنند، اما آنها را می‌توان عوض کرد تا از قطعات تشکیل‌دهنده ساختمان دائمی، به‌طور مؤثری حمایت کنند.

### مراحل پیش از راکتور

منابع و ذخایر اورانیم: اورانیم و توریم، تنها عنصر شکافت‌پذیر یا بارآوری هستند که در طبیعت یافت می‌شوند. کاربردهای متداول آنها اهمیت بسیار کمی دارند. اورانیم در صنعت سرامیک و شیشه‌گری رنگهای زرد و نارنجی ایجاد می‌کند. توریم که اکسید آن ( $\text{ThO}_2$ ) دیرگداز است در گذشته برای توریهای چراغ گاز به‌کار گرفته می‌شد و اکنون برای ساخت کانالیزورهای مصرف دارد. فراورده تقلیل شده هر دو عنصر مدتها به‌شکل فراورده جنبی جمع‌آوری می‌شد. در واقع از کانه‌های غنی از اورانیم و رودیم استخراج می‌کنند که انرژی هسته‌ای آن بی‌مصرف مانده است. در بسیاری از کانه‌های فقیر، اورانیم با کانه‌های دیگری همراه است و بزودی مصرف آنها معلوم شد (مانند فسفاتها، کانیهای طلادار، وانادیمهای آهنی و ...). کانه‌های توریم حاوی خاکهای کمیاب را برای ساختن بعضی آلیاژهای ویژه و برخی کانالیزورها و لامپهای فلئورسان به‌کار می‌گیرند.

کاربرد عمده توریم در رشته انرژی هسته‌ای، تنها در آینده متوسط یا زیاد قابل پیش‌بینی است. بدین ترتیب، وضع در خطوط کلی در مورد این عنصر تغییر نکرده است.

اما وضع اورانیم بکلی چیز دیگری است. در واقع استخراج رادیم، که تا زمانی که اورانیم هنوز هیچ کاربردی نداشت بسیار گران تمام می‌شد تنها از کانه‌های غنی (با میانگین چند در صد U)، که نسبتاً کمیاب هستند اقتصادی بود. تنها کانسارهای شناخته شده و استخراج شده آن پیش از



کشف شکافت اتمی، در بوهم و بعداً در ژنیر (کنگوی بلژیک) و مدتی بعد در گریت بر<sup>۱</sup> کانادا بودند. موجودی جهانی اورانیم غنی شده (در سال ۱۹۴۰ کمتر از ۲۰۰۰ تن عنصر U بوده است) که با استخراج شدید آن در کانادا در زمان جنگ جهانی دوم، برای رفع نیازمندیهای صنعت هسته‌ای، که تازه آغاز شده بود، کفایت می‌کرد. در زمان حال، این صنعت در هر سال حدود ۲۰۰۰۰ تن مصرف دارد و پیش‌بینی می‌شود که تا پایان همین سده، مصرف کلی این عنصر از ۲۵۰۰۰۰۰ فراتر رود و حداکثر مصرف سالانه، حدود ۲۰۰۰۰۰ باشد. پس از این سده، تقاضا کاهش خواهد یافت، زیرا راکتورهای بارآور استفاده از ذخایر  $U^{238}$  را که به شکل اورانیم فقیر وجود دارد ممکن می‌سازند و پس از آن زمان کاربرد توریم فرا خواهد رسید که به همان فراوانی اورانیم است. این نیازهای روزافزون و توجه دولتهای مختلف برای یافتن این سوخت اولیه جدید در کشور، تکان بسیار نیرومندی به اکتشافات رگه‌های اورانیم و کاربرد آن داده است.

تحرك شیمیایی اورانیم به پراکندگی فراوان این عنصر انجامیده است. سنگهای آذرین (گرانیت و بازالت) یک در میلیون وزنی اورانیم دارند. آبهای زیرزمینی می‌توانند بخشی از این اورانیم را در خود حل کنند و در شرایط گوناگون آن را در جاهای مختلف رسوب دهند. کانیهای اولیه (غنی) که از پشبلند ( $UO_2$  تاخالص) تشکیل شده‌اند و یا ترکیبات مختلط اکسیدی ( $U$ ،  $Th$ ،  $U$ ،  $Mo$  یا  $U$  و  $Nb$  و غیره) نیز تشکیل رگه‌های نازکی می‌دهند یا در قشرهای سنگی به شکل توده‌ای از بلورها یافت می‌شوند.

اینان نیز ممکن است در جریان تازه‌ای از آبهای زیرزمینی حل شوند. اورانیم به شکلهای گوناگون (اکسیدهای بالا، کربناتها، فسفاتها، واناداتها و غیره) غالباً همراه با فلزات دیگر از نو نشست می‌کند. این کانیهای «ثانوی» به شکل صفحات متبلور با توزیع بلوری وجود دارند یا سنگهای متخلخل را از خود آغشته می‌سازند. آنها را می‌توان همچنین در سنگهای متبلور و نیز در فرماسیونهای ته نشستی یافت.

جست‌وجوی سیستماتیک از پیشرفتهای کلی تکنیک به گسترده‌ای استفاده کرده است: جست‌وجوی از هوا؛ حساسیت و سبکی روزافزون وسایل اندازه‌گیری رادیواکتیویته. ژئوشیمی زمینهای مورد آزمایش میکرو آنالیز و ... به دنبال این جست‌وجو، ذخایر متعددی از کانیهای Great Bear: نواحی اطراف دریاچه‌ای با همین نام در شمال غربی کانادا.

نسبتاً فقیر (درصد وزنی U در آنها از  $۱۰^{-۴} \times ۵$  تا  $۱۰^{-۳} \times ۵$ ) کشف شدند که در سالهای ۱۹۶۴-۱۹۶۵ به طور وسیعی استخراج شدند. قدرتهای هسته‌ای، ذخایری تشکیل دادند و منابعی شناخته شدند اما کندی به راه افتادن صنعت الکتریسیته هسته‌ای «تاخت به سوی اورانیم» را آهسته کرد. اکتشافات یک رگه قابل بهره‌برداری حدود پنج سال طول می‌کشد، درحالی‌که این رگه نیز غالباً بیش از پنج تا ده سال دوام نمی‌یابد زیرا معمولاً در هر مکان مورد بهره‌برداری مقدار U از ۱۰۰۰ تن کمتر است. این وضع مقدار کار لازم برای استخراج و فعال‌سازی معدن را نشان می‌دهد و بر این نکته اشاره می‌کند که بمحض خروج از یک دوره طولانی فروش بد، در کار استخراج اورانیم، این پرسش پیش می‌آید که آیا خطر بحران دیگری در چند قدمی ما نیست؟ خطری که، برعکس، مربوط به کاهش تولید است و قیمتها فوری تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

در جهان غرب (از وضع اتحاد شوروی، چین و کشورهای سوسیالیستی چیزی نمی‌دانیم)، ذخایر اورانیم در حال حاضر حدود ۸۰۰۰۰ تن  $U_2O_8$  (ترکیب رایج این ماده برای فروش، که از کارخانه خارج می‌شود) است. تعیین ذخایر اورانیم براساس مقدار  $U_2O_8$  استخراج‌شونده با هزینه هر کیلوگرم ۱۸۰ فرانک حساب می‌شود. در این جهت ذخایر شناخته شده در حدود ۱۰۰۰۰۰۰۰ تن است (که تنها ۵ تا ۱۰٪ آن در کشورهای بازار مشترک اروپایی است). این عدد ممکن است با کشف معادن احتمالی، دو یا سه برابر شود؛ و با افزایش ۵۰٪ قیمت مینا باز هم دو برابر خواهد شد. چنانچه این مقدار برای رفع نیازهایی که در بالا از آنها یاد شده است کفایت کند، توزیع اورانیم آن‌طور نیست که بتواند همه مشکلات مربوط به ذخیره‌سازی را بویژه برای اروپای غربی برطرف سازد. مراجعه به منابع در دسترس عموم و عملاً پایان ناپذیری همچون آب دریاها (حدود ۰/۸ گرم اورانیم در هر مترمکعب) یا سنگهای گرانیت (حدود یک گرم اورانیم در هر تن و نیز همین اندازه توریم) تا مدتها به صرفه نیست. با این‌همه، استفاده از این منابع هم تحت بررسی است گرچه روشهای احتمالی استخراج آنها در حال حاضر، از اینکه دقیقاً معین باشند بسیار دور می‌باشند و به مصرف مقدار هنگفتی انرژی نیاز دارند (تلمبه‌زنی، آسیا کردن و...)؛ وانگهی برخورد اقلیمی آنها نیز زیاد شناخته شده نیست.

استخراج و شکل‌دهی: برای رگه‌هایی که هم‌اکنون مورد استفاده هستند، طریقه استخراج، سپس تغلیظ و آماده‌سازی آنها بسیار جدید است. مقدار حلالیت نیترات اورانیل در چندین حلال آلی باعث می‌شود که کاربرد روشهای جداسازی با جریان مخالف بین حلالهای اختلاط‌ناپذیر و نیز دستگاههایی (ستونهای پر شده از مواد تراوا، جداسازی با اختلاط و...) که در صنعت شیمی

شناخته شده هستند، آسان شود.

در «تخلیص هسته‌ای» از همین روشها استفاده می‌کند. آماده‌سازی و شکلهی اورانیم فلزی، اکسید ( $\text{UO}_2$ ) در همجوشیده یا کریید (UC) از سالهای ۱۹۴۵ تا ۱۹۶۰ در متالورژی فلزات کیمیا و سرامیک صنعتی، پیشگام بوده‌اند.

اما باید گفت که همکاری صنعت هسته‌ای با الکترونیک و فضاوردی اکنون تنها در محدوده‌ای است که تکنولوژی مواد جدید و نیز معمولی را به مرز می‌راند. این ادعا همان اندازه که برای ساخت انواع فولادها درست است در مورد گرافیتها، بتونها، گرمابرها، فلزات سازنده غلاف یا (و) ساختمانی نظیر زیرکونیم (و شاید بعدها وانادیم) - که تا سی سال پیش لاقال کاربردهای فعلی را نداشتند و تنها در تحقیقات آزمایشگاهی به‌کار می‌رفتند - نیز مصداق دارد.

جدا کردن ایزوتوپها: اما علاوه بر استخراج پلوتونیم (و عناصر دیگر پس از اورانیم) که ما در مراحل پس از رآکتور با آنها سروکار خواهیم داشت، انرژی هسته‌ای صنعت کاملاً نوینی، - صنعت جدا کردن ایزوتوپها - را پایه گذارده است. چند گرم نخستین آب سنگین حدود سال ۱۹۳۲ به‌دست آمد و نخستین میلی‌گرهای  $\text{U}^{235}$  ناب ده سال پس از آن. اکنون آن گرما به صدها تن آب سنگین و اورانیم غنی شده با درجات مختلف خلوص بالغ شده‌اند که هر سال، جداسازی می‌شوند؛ بدون اینکه از فراورده‌های نسبتاً کمتر اما مهمی، مانند عنصر بور ۱۰ (کمتر از ۱۰۰ گرم در سال، که در دستگاههای اندازه‌گیری و نیز تنظیم رآکتورهای با آب به‌کار می‌روند)؛ لیتیم ۶ که در رآکتورهای هسته‌ای طبق واکنش  ${}^1_0n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$  به  ${}^3_1\text{H}$  تبدیل می‌شود، سخن گویم.  ${}^2_1\text{H}$  اکنون منحصراً کاربرد جنگی دارد اما شاید بعدها برای تغذیه رآکتورهای گداختی برای واکنش  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$  به‌کار رود. لیتیم ۷ زمانی به‌کار گرفته می‌شود که بخواهند از جذب نوترونی  ${}^6\text{Li}$  پرهیز شود و ...

تجهیزات جداسازی: خود کشف ایزوتوپها بستگی به امکان جدا کردن آنها داشته است، کاری که آقای آستن آن را انجام داد. وی برای این کار در سال ۱۹۲۲ طیف‌نگار جرمی را اختراع کرد. در این دستگاه نخستین نوری یونی، دسته اشعه یونی بر اثر ترکیب از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی برحسب جرم خود تفکیک می‌شوند. در دستگاههای کنونی، ردیفی از یونهایی که یک میدان الکتریکی آنها را شتابانیده است تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی یکنواخت و عمود بر جهت انتشار، همچون قوسی از دایره خم می‌شوند (ضمناً این یکی از اصول ساختمان سیکلوترون است). چنانچه همه چیز برابر باشد شعاع این دایره با ریشه دوم جرم متناسب است و شکل مناسب

میدان مغناطیسی، تمرکز یونها را در کانون قوس سبب می‌شود: دسته یونهای خروجی در نقاطی که می‌توان یونهای دارای جرم برابر را گرد آورد، همگرایی می‌یابند.

کار جداسازی در دستگاههای اندازه‌گیری که می‌توانند از دستگاههای نور شناخت الکترومغناطیسی با شکاف زاویه‌ای اندک و چگالی یونی بسیار کم استفاده کنند، تقریباً کامل است. جدا کردن مقادیر قابل توجه ایزوتوپها، برعکس، مستلزم دسته اشعه چگال است تا «بار فضایی» که حامل آن می‌باشند به آسانی از تمرکز خارج شود. بدین ترتیب، به کاربرد منابع ویژه‌ای هدایت شدند، که مرجحاً پلاسما، که به‌طور کلی خنثی است تولید کنند، نه دسته اشعه یونی به معنای دقیق کلمه؛ و در نتیجه لازم آمد که دستگاه را اصلاح کنند. باتریهای جداکننده الکترومغناطیسی که در زمان جنگ مورد استفاده قرار می‌گرفتند برای جداسازی کامل  $U^{235}$  کمی غنی شده به‌کار گرفته می‌شدند. شماری از این دستگاههای جداکننده هنوز برای تولید، به‌مقدار چند گرم در روز، ایزوتوپهای بسیار گوناگون مخصوص کار پژوهشی، فعال می‌باشند. از انعطاف سیستم نیز استفاده شد و با میزان‌سازی میدان مغناطیسی و فاصله کلکتورها از یکدیگر توانستند از مواد گوناگون استفاده کنند.

جداسازی کامل، اصولاً با یک عمل امکانپذیر است. اما این روش انرژی زیادی، چه در منبع و چه در آهنرباهای برقی، می‌طلبد و با تولید پیوسته سازگار نیست. بنابراین، به‌طور ساده می‌توان گفت که دنباله کار با اورانیم است.

روش فوتوشیمیایی: فوتوشیمی هم می‌تواند، اساساً برای جداسازی کامل طی یک عمل به‌کار گرفته شود.

تحریک فوتوشیمیایی انتخابی براین پایه است که برای یک گونه شیمیایی، بسامدهای جذب تا اندازه‌ای به جرم هسته بستگی دارند. انواع مربوط به بسامد  $\Delta\nu/\nu$ ، برحسب مورد در حدود  $\Delta M/M$  یا  $\sqrt{\frac{\Delta M}{M}}$  هستند. در محیط گازی کمی متراکم، خطوط طیفی مربوط به انواع ایزوتوپها بخوبی جدا می‌شوند. بنابراین، اگر یک منبع نوری داشته باشیم که بسامد آن با بسامد مولکولهای ایزوتوپی منطبق باشد، این‌گونه تنها نور تابیده را جذب خواهد کرد. اگر این جذب، علاوه بر آن به حالتی تحریک شده بیانجامد که آماده واکنش فوری با واکنش‌گری باشد که با گونه شیمیایی مورد بحث در حالت تحریک نشده حساسیتی نداشته باشد یک فرایند فوتوشیمیایی مربوط به تنها یک ایزوتوپ خواهیم داشت.

از زمانی که لیزرهایی ساخته شد که می‌توانند دسته اشعه شدید و بسیار تک‌فام، با بسامد قابل تنظیم ایجاد کنند می‌توان امید داشت که فوتوشیمی انتخابی روش جالبی برای جداسازی ایزوتوپها داشته باشد (مثلاً، فوتو آکتیواسیون همراه با فوتو یونیزاسیون به کمک دو لیزر جدا از هم). بررسیهایی در این باره در چندین آزمایشگاه بشدت دنبال می‌شود، اما این روش، با اینکه عوامل خوشبین‌کننده در آن کم نیست، هنوز تا عمل فاصله زیادی دارد.

جداسازی آبشاری: همه پدیده‌های فیزیکی (از زمان پیدایش نظریه تحرک مولکولی این امر معلوم شده است) و فیزیکوشیمیایی (از زمانی که، در سال ۱۹۲۲، لیندمان<sup>۱</sup> نظریه کوانتومی کلاسیک را در ترمودینامیک شیمی به‌کار برد، گرچه تا بیست سال پس از این تاریخ، مفهوم آن بدرستی دانسته نشده بود) وابسته جرم آنها، یا (و) مولکولها می‌باشند و بر پایه مقدار جرم خود می‌توانند تفکیک شوند. بر این پایه، در برابر حرکت آشفته مولکولها، پدیده‌ای را که اساس آن بر مقدار جرم است قرار می‌دهند. نوعی جداسازی جزئی است که باید تا به دست آمدن نتایج دلخواه آن را به‌طور منظم تکرار کرد.

فرض کنیم که A و B اجزای تشکیل‌دهنده یک مخلوط دوتایی باشند. هر مرحله از جداسازی با یک مخلوط ورودی (یا تغذیه)، بخشی از مواد تولید شده و بخشی از مواد ردی و هر یک از دو جزء وارد شده از مرحله پیش یا مرحله بعدی سروکار دارد. همانند یک تقطیر جزء به جزء از اصل جداسازی با جریان مخالف، استفاده می‌شود. جزء A در این «فراورده‌ها» وارد می‌شود و جزء B در «مواد ردی» (یا برعکس، بر حسب مقدار جرمهای آنها و روش به‌کار گرفته شده). اینک نوبت تعیین است: تعداد «مراحل تغلیظ» که برای به دست آوردن A با خلوص مناسب لازم است؛ و تعداد «مراحل رقیق شدن» که برای اینکه مواد ردی نهایی مقدار زیادی از جزء A نداشته باشند. این مجموعه را «آبشار جداسازی» اصطلاح کرده‌اند. چنانچه مرتبه ردیف  $n$  (غلظت، یا برعکس، رقت) را با علامت  $\pm n$  نشان دهیم متوجه می‌شویم که بهتر است مرتبه  $n$  را با فراورده مرتبه  $(1 - n)$  با ماده ردی مرتبه  $(1 + n)$  تغذیه کنیم و در همان حال ترتیبی بدهیم که این دو مخلوط ترکیب یکسانی داشته باشند. اگر چنین نباشد بخشی از جداسازی انجام شده هدر خواهد رفت.

تعداد مراتب  $N$  لازم برای رسیدن به درجه معینی از جداسازی، اگر درصد

۱. Lindemann: فریدریک آلگزاندر (۱۸۸۶-۱۹۵۷)، فیزیکدان انگلیسی.

اولیه ایزوتوپ مورد نظر، یا ضریبی که کارایی هر مرتبه را نشان می‌دهد کاهش یابد، سرعت بسیار زیاد خواهد شد. با همین روش شمار مراتب کم شدن  $N$  تعیین می‌شود.

متوجه می‌شویم که این سیستم، همواره محتوی مقداری از جسم است (هر قدر ضریب مشخص‌کننده هر مرتبه کم باشد مقدار جسم زیادتر است) که در یک شاره «بالا رونده» غلظت و یک شاره «پایین آینده» تخلیه بخش شده است. چنانچه مقدار این صعود و نزول را نداشته باشیم این شاره‌ها تسهیم غلظتها را تأمین می‌کنند. با شباهتی که کار تقطیر با جداسازی دارد می‌توان حالت یک ستون تقطیر دارای باز روانی کلی و بدون تولید را تصور کرد. برای اینکه تولید داشته باشیم باید بر شاره دایمی یک شاره تولید تحمیل کرد تا توزیع غلظتها در تمام طول آشبار تغییر کند: کارایی جداسازی با برداشت کاهش می‌یابد.

با این‌همه، مفید است که شاره تولید نسبت به شاره کلی هرچه بزرگتر باشد، زیرا برای مقدار معینی تولید، حجم تجهیزات (بنابراین بهای تولید)، انرژی لازم برای به گردش درآوردن همه فرآورده‌های مربوطه، و نیز زمان ضرور برای راه‌انداختن این فرایند در آغاز کار یا پس از وقفه‌ای که ناشی از حادثه‌ای است (بنابراین هزینه تولید)، با کم شدن شاره کل، پایین می‌آیند. ثابت شده است که بهترین روش این است که شاره از هر مرتبه به مرتبه بعدی، متناسب با دور شدن از مخلوط اولیه، کاهش یابد.

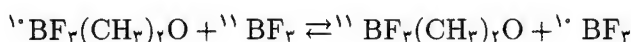
بدین ترتیب، زمانی که جداسازی مورد نظر تنها به چند طبقه نیاز دارد، مثلاً در بیشتر جداسازیهای شیمیایی که کارایی هر طبقه زیاد است، از «آشبار ایده‌آل» کاملاً صرف‌نظر می‌شود. در حالت معکوس که بویژه مربوط به جداسازیهای ایزوتوپی است، طبقه‌ها را در تعدادی از سریها مجتمع می‌سازند و در هر سری، هر طبقه می‌تواند از واحدهای یکسانی که به شکل موازی روی یکدیگر قرار دارند تشکیل شده باشد و هرگاه شماره ردیف طبقه بالا می‌رود تعداد آن پایین می‌آید. در چنین حالتی کار بهینه‌سازی بسیار دشوار است اما اشکال اساسی ندارد.

در پایان باید گفت که طبقه‌ها را می‌توان با دستگاههای معینی تجسم داد (دستگاههای جداسازی با اختلاط برای جداسازیهای با حلال؛ ستونهای بشقابکدار برای تقطیرهای جزءبه‌جزء؛ دستگاههای مرکزگریز سریع یا دستگاههای دیفوزیون (نفوذیابی) برای جزءبه‌جزء کردن ایزوتوپی UF<sub>6</sub>). اما آنها را می‌توان همچنین به قسمت معینی از یک دستگاه حواله داد، مثلاً یک ستون

از تقطیر یا جداسازی مایع-مایع که شاره بالارونده و پایین آینده، با نوعی پر کردن ویژه با یکدیگر آمیزش می‌یابند.

زمانی که آمیزه‌های جدا کردنی از گونه‌های شیمیایی مختلفی هستند کوشش می‌شود که لااقل یکی از این گونه‌ها حتی المقدور به‌طور کامل با خلوص زیاد به‌دست آید. کار جزء به جزء کردن این گونه‌ها بر پایه تفاوت حلالیت، ثابت تعادل واکنش با یک واکنشگر (مثلاً یک تبادلگر یونی)، ضریب تسهیم بین دو حلال و ... انجام می‌گیرد. تنها در زمانی که با دو ماده با خواص کاملاً نزدیک به هم سروکار داریم (مثلاً خاکهای کمیاب) راه بسیار آسان این است که در پی سیستمی برآیم که با آسانی فراوان جداسازی تقریباً کامل را ممکن سازد.

در جداسازی ایزوتوپی، کارایی در هر طبقه بسیار کم است؛ درحالی که غالباً می‌توان به یک جداسازی جزء به جزء رضایت داد و هزینه این کار از ماده خام چنان بالاتر است که در بهترین شرایط، غالباً تنها بخشی از مقدار کل ایزوتوپ مورد نظر موجود در ماده خام به‌دست می‌آید. مورد بور: جداسازی ایزوتوپهای بور ( $^{10}\text{B}$  و  $^{11}\text{B}$  که فراوانی آنها در طبیعت به ترتیب: ۱۸/۸۳ و ۸۱/۱۷ است) بر پایه  $\text{BF}_3$  که در دمای معمولی گازی است، قرار دارد. آن را در اثر  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$  حل می‌کنند تا یک ترکیب افزایشی  $\text{BF}_3(\text{CH}_3)_2\text{O}$  به‌دست آید که به‌هنگام تبخیر، تفکیک می‌شود. تقطیر جزء به جزء این محلول با نوعی تقطیر با واکنش دقیقاً تبدلی همراه است:



هر دو فرایند میل به غنی کردن حالت گازی با  $^{10}\text{B}$  دارند. این، نوعی جداسازی نسبتاً آسان است: ضریب کارایی، خیلی پایین نیست و درصد اولیه  $^{10}\text{B}$  بقدر کافی بالا است. لزوم پرهیز از هر ذره آب (زیرا  $\text{BF}_3$  سرعت هیدرولیز می‌شود) و نیز عمل کردن در فشار چند اتمسفر، مسائلی هستند که با روشهای بسیار معمولی مهندسی شیمی حل می‌شوند.

... لیتیم: لیتیم طبیعی دارای ایزوتوپهای  $^6\text{Li}$  و  $^7\text{Li}$  با درصد ۷/۴ و ۹۲/۶ است. تولید  $^3\text{H}$  در عمل، در سال به چندین تن  $^6\text{Li}$  نیاز دارد. چون تولید این ماده بیش از هر چیز، جنگی است روشهای تولید آن در پرده‌ای از پنهانکاری پوشیده شده است. شکی نیست که از واکنش تبدلی بین محلولی که محتوی نمکی از لیتیم است و یک تبادلگر یونی یا ملغمه لیتیم استفاده می‌شود. در مورد اخیر، نمک لیتیم در حلالی آلی حل می‌شود، زیرا واکنش ملغمه با آب بسیار سریعتر از واکنش تبدلی است

... آب سنگین: در استفاده از آب سنگین، دشواری کار قبل از هر چیز، کمی عنصر دوتریوم در طبیعت (یک اتم دوتریوم در هر ۶۴۰۰ اتم هیدروژن)، و لزوم رسیدن به خلوص بسیار زیاد ایزوتوپی است، زیرا ایزوتوپ H نوترونها را ۷۰٪ بار بیشتر از ایزوتوپ D گیر می‌اندازد. اما، باید ضریب کارایی بالا باشد زیرا جرم D دو برابر جرم H است و ضریب کارایی تابع دور شدن از جرمهاست،  $\Delta M/M$  سه روش به‌کار رفته است که غالباً همراه با یکدیگر می‌باشند و تفاوت اساسی با هم ندارند:

- تقطیر آب، هیدروژن یا آمونیاک مایع؛

- الکترولیز محلولهای قلیایی؛

- تبادل شیمیایی.

الکترولیز، نخستین تکنیکی بود که در این راه به‌کار گرفته شد؛ در حال حاضر با اینکه بکلی حذف نشده، اما از رده خارج است.

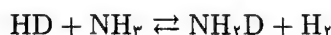
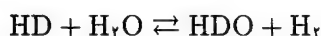
در الکترولیز یک محلول آبی، هیدروژنی که تشکیل می‌شود آشکارا از D فقیر می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که D در محلول تمرکز یافته است. ضریب جداسازی، که تابعی از دما، نوع الکترود و چگالی جریان برق است، بزرگ می‌باشد. بنابراین، می‌توان در یک باتری الکترولیز، اجتماع ظرفها و گردش الکترولیت را تأمین کرد (بدون فراموش کردن تراکم بخار آبی که با آزاد شدن هیدروژن آزاد می‌شود!)؛ به‌طوری‌که آبشاری به‌وجود آید تا این محلول بتدریج از  $D_2O$  غنی شود (پنج طبقه کافی است). نوعی پیچیدگی که در همه مواردی که از مولکولهای دارای بیش از یک اتم H استفاده می‌شود، وجود دارد برخاسته از این واقعیت است که نه تنها باید مولکولهای  $H_2O$ ،  $D_2O$ ،  $H_2$  و  $D_2$  را در نظر گرفت بلکه  $HDO$  و  $HD$  نیز در کار هستند. آشکارا بازروانی مطرح نیست جز اینکه هیدروژن لااقل همین‌که مقدار D آن به غلظت طبیعی رسید از نو می‌سوزد (اما کارخانه‌های الکترولیز به‌طور کلی هدف اصلیشان تولید هیدروژن است)، یا ترکیب الکترولیز با نوعی واکنش تبدالی بین  $H_2$  و  $H_2O$  یا  $NH_3$  است؛ که در این صورت صرف‌نظر کردن از الکترولیز بسیار با صرفه است.

برای تقطیر  $H_2$  مایع، آبشار چهار طبقه‌ای، خلوص مطلوب را به‌دست می‌دهد. دشواری اصلی، لزوم دمای بسیار پایین است. وانگهی واکنش تبدالی  $HD + HD \rightleftharpoons H_2 + D_2$  حتی در مجاورت کاتالیزورها کند است، واقعیتی که سبب پیچیدگی تجهیزات می‌شود. مصرف برق برای  $D_2O$  چند کیلووات ساعت برای هر گرم است. واحدهای آزمایشی چند تنی در سال، بخوبی کار کرده‌اند اما سرانجام این روش کنار گذاشته شد.

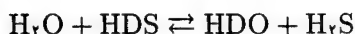


چنین می‌نماید که تقطیر  $\text{NH}_3$  مایع نسبت به آب برتری ندارد. در ممالک متحده آمریکا در زمان جنگ برای تولید صدها تن آب سنگین اولیه، از تقطیر آب استفاده می‌شد و اینک تنها برای تغلیظ نهایی یا برای تغلیظ دوباره آبهای سنگینی که در جریان کاربردشان، کمی آلوده آب معمولی شده‌اند، به‌کار می‌رود (از این تجربه برای به‌دست آوردن آب غنی از  $^{18}\text{O}$  مورد نیاز آزمایشگاهها استفاده شد).

از سه واکنش تبادلی مورد استفاده، دو واکنش از آنها هیدروژن را به‌کار می‌برند:



هر دو واکنش نیاز به کاتالیزور دارند. اما واکنش تبادلی ( $\text{H}_2$  و  $\text{NH}_3$ ) پتاسیم آمید  $\text{NH}_2\text{K}$  محلول در آمونیاک مایع است. برعکس، تبادل ( $\text{H}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$ ) نیاز به یک کاتالیزور جامد دارد (که بر پایه نیکل یا پلاتین باشد) که فقط در نبودن آب مایع فعال است. بدین ترتیب، برای واکنش تبادلی ( $\text{H}_2$  و  $\text{NH}_3$ ) دو مزیت (بهترین ضریب کارایی در هر طبقه، کاتالیزور محلول) دیده می‌شود. هر دو ماده در مقیاس صنعتی ساخته می‌شوند (حدود  $100$  تن در سال برای اولی و  $20$  تن در سال برای دیگری) با صرف انرژی حدود یک کیلووات در ساعت برای هر گرم  $\text{D}_2\text{O}$ . اما هنوز این روش از روش سوم، که نیازی به کاتالیزور ندارد، پیشی نگرفته است:



این تبادل را در سیستمی «دوآتشه» به‌کار می‌برند. در طبقه  $n$  در دمای  $30^\circ\text{C}$  ترکیب  $\text{H}_2\text{S}$  مقداری از  $\text{D}$  خود را به آب وا می‌گذارد. مقداری از این آب به بخش سرد طبقه  $n+1$  می‌رود و بقیه آن مقداری از  $\text{D}$  را در بخش گرم همان طبقه  $n$  به  $\text{H}_2\text{S}$  می‌دهد. ترکیب  $\text{H}_2\text{S}$  از این بخش به بخش سرد  $n$  رانده  $123$  ناعوره دوتریوم ایجاد می‌شود، درحالی‌که

برابر  $30^{\circ}\text{C}$  و در بالا به علل خوردگی و مصرف دما  $130^{\circ}\text{C}$  درجه است. برای اینکه آب حالت مایع خود را از دست ندهد و غلظت کافی از  $\text{H}_2\text{S}$  تأمین باشد کار را در فشار معتدلی انجام می‌دهند. نوعی آبشار طبقه‌های دوگانه، آب را تا حدود ۱۵٪ از  $\text{D}_2\text{O}$  غنی می‌کند و در پایان آن را تقطیر می‌کنند.

جداسازی ایزوتوپهای اورانیم: روش کار در مورد اورانیم بکلی تفاوت دارد. تفاوت نسبی جرمهای دو ایزوتوپ مهم ( $126/0 = 3/238$ ) چنان کم است که هیچ‌یک از تبدیلهای گوناگون شیمیایی آزمایش شده هیچ مقدار عملی از کارایی طبقه به ما نمی‌دهند. تنها ترکیب تبخیرشونده و پایدار آن  $\text{UF}_6$  پیش از ذوب شدن تصعید می‌شود. بنابراین، تقطیر جزبه‌جزه آن عملی نیست. از این رو، به روشهای فیزیکی بسنده می‌کنند که تنها دیفوزیون گازی آن در سال ۱۹۴۴ گسترش مهمی در صنعت یافت. روش دیگری که مرکزگریزی سریع گازی است چنین می‌نماید که در آینده نزدیکی رقیب روش نخست شود، روش سوم که گذرانیدن جهشی گازی با سرعت مافوق صوت از میان یک زنبورک خمیده است (از مرکزگریزی با جدار ثابت سخن می‌رود) در تأسیسات آزمایشی به موفقیت نزدیک می‌شود.

دیفوزیون گازی: دیفوزیون گازی (که دقیقتر است آن را نفوذ مولکولی بنامیم) عبارت است از راندن  $\text{UF}_6$  از روزه‌های بسیار تنگ یک جدار ظریف.

تعداد برخوردهای مولکولها گازی با جرم مولکولی  $M$  با سطح معینی از جدار در واحد زمان متناسب است با  $1/\sqrt{M}$ . در مخلوطی از جرمهای مولی  $M$  و  $M'$  ( $M' < M$ )، سازی سبکتر، بیش از دیگری با روزه برخورد دارد و در رابطه  $\sqrt{M/M'}$  سریع‌تر نفوذ می‌کند و ضریب جداسازی سرشتی آن عبارت است از:  $\alpha = \sqrt{M/M'}$  که برای  $\text{UF}_6$  مقدار  $\alpha = 1.043$  است.

در یک میدان گرانشی، ترکیب یک مخلوط گازی آرام و با دمای ثابت، برحسب ارتفاع تغییر می‌کند و سنگینترین جزء سازنده در پایین جمع می‌شود و عامل تعیین‌کننده، رابطه انرژی پتانسیل  $Mgh$  (g شتاب سقوط و  $h$  ارتفاع) به انرژی اغتشاش گرمایی  $RT$  (T دمای مطلق و R ثابت گازهای ایده‌آل) است. بنابراین ترکیب اتمسفر تغییر نمی‌کند، اما این ترکیب نه دمای ثابت دارد و نه آرام است.

چنانچه گاز درون استوانه‌ای با شعاع  $r$  باشد که با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  می‌گردد

با وضع مشابهی روبه‌رو هستیم. در هر بخش راست استوانه (در غیاب جریانهای همرفتی (کنوکسیون)، هر مولکول با جرم  $m$  در نوعی میدان نیروی شعاعی است که شدت آن در فاصله  $x$  از محور برابر  $m\omega^2 x$  است که شیب یک انرژی پتانسیل  $\frac{1}{2}m\omega^2 x^2$  است. بر همین اساس (قسمت پایین اتمسفر که مربوط به بیرون استوانه است)، غلظتهای  $N$  در کنار و  $N^\circ$  روی محور استوانه، مربوط به یک ضریب جداسازی خواهند شد:

$$\alpha = 1 + \frac{M - M'}{2RT} \omega^2 r^2$$

دید می‌شود که  $(\alpha - 1)$  با  $(M - M')$  متناسب است، درحالی‌که در مورد دیفوزیون:

$$\alpha = \sqrt{M/M'} = \sqrt{1 + \frac{M - M'}{M'}} = 1 + \frac{M - M'}{2M'}$$

چنانچه بتوان دستگاههایی نظیر  $\frac{\omega^2 r^2}{RT} > \frac{1}{M'}$  را به تصور آورد مرکزگریزی اساساً بر دیفوزیون برتری دارد. اگر  $\omega r$  سرعت صوت برسد یعنی  $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  آن‌گاه  $\alpha = 1.054$  خواهد بود و بنابراین  $\alpha - 1 = 0.054$  ده برابر بزرگتر از پارامتر دیفوزیون ( $0.043$ ) است. چیزی که می‌ماند مقایسه روشها و هزینه عملکرد آنهاست.

این طرحها را می‌توان به کمک مفاهیم قدرت جداسازی و کار جداسازی مشخص ساخت (کاربرد این اصطلاحها در زبان متداول صنعت هسته‌ای قابل سرزنش است، زیرا آنها تنها دلالت بر مقادیری دارند که در فیزیک نیز با همین نام خوانده می‌شوند).

با فرض اینکه تابعی به شکل  $V(x)$  به نام تابع مقدار وجود دارد که حاصلضرب آن در مقدار خروجی، قدرت جداسازی تعریف می‌شود می‌توان یک طبقه جداسازی را مشخص کرد. مقدار  $V$  برای یک طبقه  $n$  عبارت است از:

$$\Delta_n = P_n V(x_p) + R_n V(x_n) - E_n V(x_e)$$

ثابت می‌شود که (اگر  $x$  کسر مولی در ایزوتوپ کمیاب باشد):

$$V(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1 - x}$$

چنانچه به شرایط حدی رضایت دهند

$$V(0, \Delta) = V'(0, \Delta) = 0$$

برای به اصطلاح آبشار کامل با خروجیهای مربوط به ورودی E، تولید P و ردی R داریم:

$$E = P + R$$

$$Ex = Px_P + Rx_R$$

$$\Delta = PV(x_P) + RV(x_R) - EV(x)$$

$\Delta$  ابعاد خروجی را دارد (مقدار آن در واحد زمان است و بنابراین نامگذاری نامناسب قدرت). حاصلضرب آن در زمان (بنابراین نام کار: قدرت  $\times$  زمان) واحدی از جسم خواهد بود (موفقیت ناراحت کننده ای که یک «کار جداسازی» برحسب کیلوگرم اندازه گرفته می شود!).

بدین ترتیب به مشخص کردن ظرفیت یک کارخانه برحسب «تن کار جداسازی در سال» رسیدند (به طور روزافزونی گفته می شود: واحد کار جداسازی یا UTS).

$\Delta$  تنها تابع مقادیر ورودی، ردی و تولید است؛ بنابراین مقادیر  $x$  و خروجیها، نه به روش جداسازی بستگی دارد و نه به طرز عملی کردن این روش. در به اصطلاح یک آبشار ایده آل که خروجی در هر مرتبه بهینه است ثابت می شود که خروجی کل برابر است با

$$\Delta / \left( \frac{\alpha - 1}{2} \right)^2$$

این خروجی کل و بنابراین انرژی لازم برای انجام آن، با کم شدن  $\alpha$  سریعاً افزایش می یابد.

در یک آبشار واقعی همه این مراتب به طور کیفی صحیح هستند، گرچه کمتر از آبشار ایده آل سود بخش می باشند. هزینه این کار برحسب کیلوگرم ایزوتوپ خالص (یا مخلوط غنی شده)  $C_P$  شامل بهای ماده خام و هزینه غنی سازی است

$$C_P = C_E E + C_\Delta \Delta - C_R (E - 1)$$

این بهای اورانیم طبیعی (به شکل  $UF_6$ ) برحسب کیلوگرم است. مقدار  $E$ ، تعداد کیلوگرم اورانیم طبیعی است که برای به دست آوردن یک کیلوگرم فراورده مورد نظر لازم می‌باشد. مقدار  $C_R$  تعداد کیلوگرم مخلوط ردی (عملاً صفر) است. مقدار  $C_\Delta$  هزینه واحد کار جداسازی است که بستگی شدید به طرز کار دارد؛ بالاخره باید گفت که  $\Delta$  تعداد واحد «کار جداسازی» لازم برای تهیه یک کیلوگرم فراورده است.

کارخانه دیفوزیون: بخشهای اساسی کارخانه دیفوزیون عبارتند از:

- پوشش نفوذناپذیر، که یک غشای تراوا آن را به دو قسمت می‌کند و  $UF_6$  گازی از میان آن می‌گذرد؛

- کمپرسوری که گازی را که از غشاء تراوش می‌کند می‌مکد و پس از عبور دادن از یک تبادل‌کننده گرمایی، که گرمای تراکم را می‌گیرد، آن را به درون واحد بعدی می‌راند.

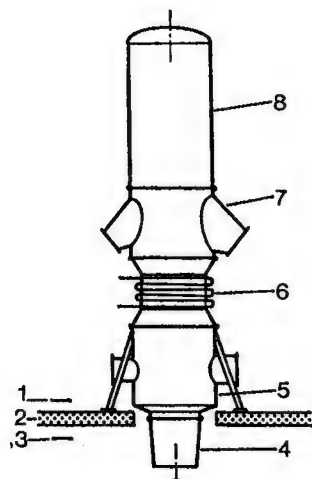
- کمپرسور دیگری که گازهای مانده را می‌گیرد و آن را، سرد شده، از نوبه واحد پیشین تزریق می‌کند. تعداد مورد نظر واحدهای موازی، یک طبقه را تشکیل می‌دهند و سری طبقات، یک آبشار را (شکلهای ۱۲۲ و ۱۲۳).

همان‌طور که گفته‌ایم ابعاد و عده واحدها را طوری معین می‌کنند که آبشار واقعی، تفاوت چندانی با آبشار ایده‌آل نداشته باشد (شکل ۱۲۴).

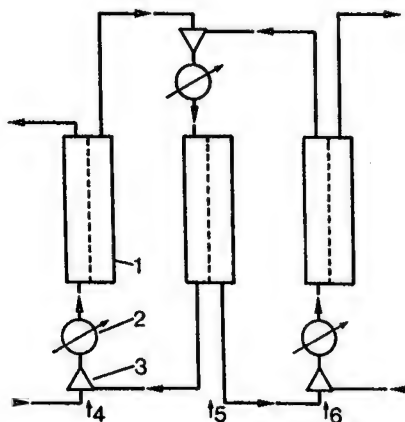
همه کارخانه را باید در دمایی نگاه داشت که در هیچ بخشی  $UF_6$  جامد ایجاد نشود. تنها موادی که می‌توانند با  $UF_6$  تماس داشته باشند نیکل، آلومینیم، مس و آلیاژهایی از فولاد و نیز تعدادی سرامیک می‌باشند. ذرات آب هم باید حذف شوند زیرا تشکیل HF بسیار خورنده و اکسی‌فلوئورید اورانیم جامد می‌دهند که ممکن است خلل و فرج غشاها را ببندند. روغن‌ها و گریسهای معمولی محتوی هیدروژن نیز زیان‌آور می‌باشند و به جای آنها از فلوئور و کربنها استفاده می‌شود. صنعت هسته‌ای پایگاه انواع فرئون و تفلون، که کاربردهای زیادی دارند، نیز بوده است.

سمیت  $UF_6$  بیش از هر چیز ناشی از هیدرولیز است و لزوم پرهیز از کمترین مقدار نشست اورانیم، بویژه غنی شده از ۲۳۵، مستلزم نفوذ ناپذیری تقریباً مطلق است و هر کجا که احتمال نشست می‌رود (مثلاً گذرگاههای محورها)، برای بازیابی  $UF_6$  باید تمهیداتی در نظر گرفته شود.

همین‌که  $UF_6$  به‌طور محسوسی از اورانیم ۲۳۵ غنی شد ممکن است شرایط بحرانی پدید آید. در طرح واحدها و هندسه منضّمات آنها باید این خطر در نظر گرفته شود و در عین حال ضروری



شکل ۱۲۳. نمایه عمودی یک دستگاه دیفوزیون.  
 ۱. محل دستگاههای دیفوزیون؛ ۲. سکوی حامل؛  
 ۳. منطقه بدون اورانیم؛ ۴. موتور برق؛ ۵. قطعه  
 محتوی کمپرسور؛ ۶. تبادلاگر گرما؛ ۷. قطعه میانی  
 و اتصالات؛ ۸. دستگاه دیفوزیون.

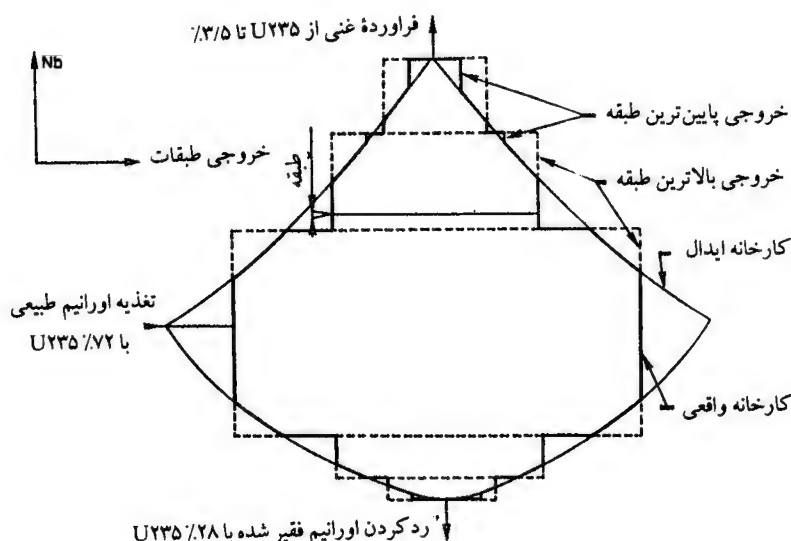


شکل ۱۲۲. نمایه یک آبشار برای جداسازی  
 ایزوتوپهای اورانیم با دیفوزیون  $UF_6$ .  
 آرایش سه طبقه پایینی؛ ۱. دستگاه دیفوزیون که  
 یک غشای تراوا (خطهای گسسته) آن را به دو  
 بخش کرده است؛ ۲. تبادلاگری که گرمای تراکم را  
 از بین می‌برد؛ ۳. کمپرسور؛ ۴. طبقه ردیف  $n - 1$ ؛  
 ۵. طبقه ردیف  $n$ ؛ ۶. طبقه ردیف  $n + 1$ .

است که از ایجاد حجمهای مرده بین بخشهای دیفوزیون پرهیز کرد.

برای اینکه غشاءها به طور مؤثری کار کنند باید شرایط گوناگونی حکمفرما باشد: ترکیب  $UF_6$  در آنها ایجاد خوردگی نکند؛ از جنبه مکانیکی بسیار مستحکم باشند؛ نفوذپذیری خوبی داشته باشند؛ خلل و فرج آنها متناسب با کار جداسازی از راه نفوذ باشد.

خلل و فرج غشاء، ناگزیر بزرگتر و بویژه ضخیمتر از ابعاد مولکولها هستند. چنانچه ابعاد یک روزنه از مساحت آزاد میانگین مولکولها در گاز بالا کوچکتر باشد مولکولهایی که وارد می‌شوند عملاً در آنجا یک به یک درگیر خواهند شد و در مسیر خود از یکدیگر بی‌خبر خواهند بود. مولکولهای سبکتر بیشتر تردد دارند، سریعتر می‌گذرند و روزنه، کار جداسازی خود را انجام می‌دهد. چنانچه بزرگی روزنه از مسافت آزاد میانگین مولکولهای واردشونده بسیار بزرگتر باشد این مولکولها به یکدیگر تهنه می‌زنند و بی‌نظمی پدید می‌آید: در نهایت، روزنه بسیار بزرگ را می‌توان سوراخ نامید و



شکل ۱۲۴. نمایه یک کارخانه دیفوزیون برای تولید اورانیم غنی مناسب راکتورهای با آب. ابعاد افقی، متناسب با خروجی طبقه است و ابعاد عمودی، متناسب با تعداد طبقه‌ها.

هیچ‌گونه جداسازی را انجام نمی‌دهد.

بنابراین، باید روزنه‌ها به حد کافی یکسان و از مسافت آزاد میانگین کوچکتر باشند. از روزنه‌های بزرگ باید پرهیز کرد زیرا موج گازی وارد شده در آنجا بلعیده می‌شود و مقدار کمتری را با دشواری زیادتر رقیق می‌سازد درحالی‌که از روزنه‌های کوچک با کارایی بیشتری می‌گذرد.

گرچه جداسازی ایزوتوپهای اورانیم از طریق دیفوزیون در پنج کشور در مقیاس صنعتی انجام می‌گیرد، تکنولوژی ساخت غشاءهای تراوا هنوز سری است. تصور می‌شود که برای ساخت این غشاءها از نیکل در همجوش یا سرامیک ( $Al_2O_3$ ) در همجوش استفاده می‌شود. کاربرد دانه‌های بسیار کوچک امکان می‌دهد که روزنه‌های بسیار کوچک، در حدود  $200$  آنگستروم یا  $2 \times 10^{-8}$  متر به دست آید که تعداد آنها در واحد سطح برای تأمین محصولی درخور کافی است. غشاءهای لوله‌ای طی سالها کاربرد، رضایت‌بخش بوده‌اند.

ضریب جداسازی  $\alpha = \sqrt{M/M'}$  برای  $UF_6$  برابر  $0.0043$  است؛ که

ماگزیم نظری برای غشاء کاملی است که با گازی دارای ترکیب ثابت تغذیه شده است، درحالی که گاز مرحله قبلی بیدرنگ دور شده است.

بنابراین، گازی که وارد می شود طول کم و بیش زیادی از این غشاء را درمی نوردد و در این جریان از ایزوتوپ  $^{235}\text{U}$  به تناسب فقیر می شود. نمی توان برای صرفه جویی کردن در قدرت پمپاژ و کاهش کارهای مکانیکی، در مرحله قبلی خلأ شدیدی ایجاد کرد. بدین ترتیب، نوعی دیفوزیون به پس، از مرحله قبلی به بعدی وجود دارد که تأثیر جداسازی را کم خواهد کرد. این غشاءها کامل نیستند. با در نظر گرفتن همه عوامل، ضریب جداسازی مؤثر،  $1/002$  خواهد بود.

با مقدار بالا و بخش مولی نخستین  $235$ ، مقدار  $x$  برابر  $10^{-3} \times 7/2$  می باشد و آبشار ایده آل، اگر  $x_P = 0/90$  (اورانیم برای انفجار) باشد  $3570$  طبقه خواهد داشت، و اگر  $x_P = 0/04$  (سوخت برای رآکتورهای با آب) باشد  $880$  طبقه دارد. بهترین مقدار  $x_R$ ، تابع رابطه  $C_D/C_E$  (چون  $C_R = 0$ ) و معمولاً  $0/002$  است. تعداد طبقات ردی،  $640$  خواهد بود.

جدولهایی از مقادیر  $C_P$  و  $\Delta$  تابعی از  $x_P$  در دست است. بهای اورانیم غنی شده، قیمت واحد کار جداسازی را به ما می دهد که شامل استهلاک کارخانه، هزینه های کارگری و قیمت انرژی به کار رفته است. تفصیل این قیمتها در دست نیست، تنها می توان استنتاج کرد که مصرف برق و مقدار تولید کارخانه های جداسازی با روش دیفوزیون، امکان می دهد که تخمین بزنیم که مصرف  $500 \pm 100 \text{ kWh}$  برای هر گرم  $^{235}\text{U}$  افزوده شده است و یک «واحد کار جداسازی» مربوط به مصرف  $500 \pm 2500 \text{ kWh}$  است دست کم (برای کار غنی سازی کم).

بنابراین، کارخانه اورودیف که گروهی از کشورهای اروپا پیشنهاد ساخت آن را در فرانسه می کنند در سال  $1980$  ظرفیتی برابر  $10^6 \text{ UTS} \times 5$  در سال خواهد داشت (که پنج سال پس از آن ظرفیت آن دو برابر خواهد شد)، و  $2000$  و بعداً  $4000 \text{ MWé}$  مصرف خواهد کرد و سالانه حدود  $1500$  تن و بعد  $3000$  تن اورانیم دارای  $3\%$  از  $^{235}\text{U}$  تولید خواهد کرد که باید حدود  $70$  تن برای دل نخستین یک رآکتور  $1000 \text{ MWé}$  و یک سوم آن برای تجدید سوخت آن در سال باشد. بهای آن با نیروگاههایی که تغذیه می کند بین  $15$  تا  $20$  میلیارد فرانک (در سال  $1975$ ) است. قیمت برای  $C_D \text{ UTS}$  کارخانه کوچکتر، به طور چشمگیری بیشتر است.



مسائل مربوط به مرکزگریزی: چون مرکزگریزیهایی که سرعت محیطی آنها بسرعت صوت در هوا ( $\alpha - 1$ ) می‌رسد ده برابر قیمت دیفوزیون تمام می‌شود، بنابراین، به تعداد طبقات کمتری نیاز است و محصول کلی بسیار کمتر از مقدار محصول در آبشاری از دیفوزیون دارای همان  $E, P, R$ , می‌باشد. مصرف برق برای هر UTS پنج تا ده بار کمتر از روش دیفوزیونی است. اما مقدار  $\alpha - 1$  به نسبت مجذور سرعت محیطی تغییر می‌کند و آثار مکانیکی چرخش، سرعتش را محدود می‌سازند. این آثار از یک‌سوی عبارتند از: ارتعاشهای محور که احتمالاً در بعضی از سرعتهای زاویه‌ای، که رابطه ارتفاع به قطر استوانه، آن را معین می‌سازد، با رزونانسهای خطرناک مواجه می‌شوند؛ و از سوی دیگر، اثر نیروی مرکزگریز روی دیواره بیرونی.

چنانچه فشار ناشی از نیروی مرکزگریز از بار پارگی ماده‌ای که استوانه از آن ساخته شده است بیشتر شود استوانه خرد می‌شود. انرژی لازم برای گرداندن ماشین، متناسب سبکی این ماشین، کم است، کاربرد فلزات سبک یا پلاستیکی با الیاف شیشه‌ای، یا بهتر، از کربن، که استوانه را سبک و محکم می‌سازد در تکنولوژی دستگاههای مرکزگریز برای UF<sub>6</sub> پذیرش قطعی یافته است.

وانگهی، می‌توان گردش گاز را (با وسایل مکانیکی یا گرمایی) چنان ترتیب داد که تنها یک استوانه گردان با چندین طبقه هم‌ارز باشد. در اینجا مانند کارخانه‌های دیفوزیونی راه‌حلهای شایسته پنهان نگاهداشته می‌شوند. از استوانه‌های با ۴۵ سانتیمتر قطر و ۳/۱۵ متر طول سخن می‌رود که سرعت محیطی آنها  $20 \pm 320 \text{ ms}^{-1}$  می‌باشد. مدت کاربرد هر ماشین را بیش از ده سال تخمین می‌زنند.

آبشارهای آزمایشی با حدود ۱۰۰۰۰۰ دستگاه مرکزگریز در دوازده طبقه ( $x_P \sim 0.02, x_R \sim 0.02$ ) و با ظرفیتی عملاً حدود  $2 \times 10^5 \text{ UTS}$  یا فعال‌اند یا در مرحله طراحی. اعلام شده است که ظرفیت هر واحد  $C_{\Delta}$  هرگز از ظرفیت  $10^6 \text{ UTS}$  در سال کمتر نخواهد بود و می‌توان با دو میلیون دستگاه مرکزگریز، ظرفیتی برابر  $10^7$  به دست آورد.

هر دو روش جداسازی ایزوتوپهای اورانیم استعداد تکمیل دارند. نیاز به اورانیم غنی شده ظاهراً در حدی است که مقایسه فنی-اقتصادی هر دو روش، در شرایط واقعی، طی سالهای آینده امکان‌پذیر است.

در باره جداسازی با شیوره، اطلاعات موجود باز هم کمتر است. می‌دانیم که یک کارخانه آزمایشی در سال ۱۹۷۵ در آفریقای جنوبی پایه‌گذاری شده است. این کارخانه از مخلوطی از UF<sub>6</sub> + H<sub>2</sub> استفاده می‌کند. معمولاً چنین می‌اندیشند که سرمایه‌گذاری در چنین کارخانه‌ای با

روشهای دیگر تفاوتی ندارد و مصرف برق آن برای هر واحد کار جداسازی، ۱/۵ تا ۲ برابر روش دیفوزیون گازی است.

### مراحل پس از رآکتور

سوخت شیمیایی که در کوره دیگهای بخار یا سیلندر موتورهای درونسوز کاملاً (یا تقریباً) سوخته می شود گازهایی - اکثراً  $H_2O$  و  $CO_2$  ایجاد می کند که در هوا یا اقیانوسها به آسانی پراکنده می شوند و هیچ گونه زیانی ندارند؛ و تراکم  $CO_2$  در هوا، در طول زمان، می تواند نتایج اکولوژیکی داشته باشد، که هنوز کاملاً شناخته شده نیست و به پژوهشهای جدی و دشواری نیاز دارد. خاکستر زغال بسیار مزاحم است، اما به شکل کم و بیش رضایت بخشی و معمولاً به طور سنتی در دسترس است. مواد نسوخته (اسانس، مازوت، دوده) و بعضی فرآورده های سوختی ( $SO_2$ ,  $CO$ ) که یا نتیجه تنظیم غلط موتور یا ناخالص بودن سوخت هستند موجب زیانهای هستند که حذف آنها دشوارتر و پرهزینه است؛ اما رفته رفته، با بالا رفتن مصرف و کم شدن حساسیت مردم پذیرفتنی شده اند. برعکس رآکتورهای هسته ای مستقیماً تنها می توانند بخشی از سوخت خود را مصرف کنند (لااقل ۱٪ تا ۱۰٪). با چنین وضعی آنها می توانند سوختی تازه و آخال رادیوآکتیو بالقوه بسیار خطرناکی تولید می کنند.

یک جنبه برجسته صنعت هسته ای، فهم چرخه سوخت است. زمانی که یک بار سوختی از رآکتور بیرون می آید باید سوخت مصرف نشده بازبازی شود؛ سوخت تازه تشکیل شده، جدا گردد و هر دو سوخت، از نو قابل استفاده شوند. وانگهی، آخال رادیوآکتیو را باید جدا کرد و آن را «بی زیان ساخت». این کار با ایجاد شرایط و نوعی انبار کردن، که در ردیف کارهای مهم این صنعت هستند، انجام می گیرد.

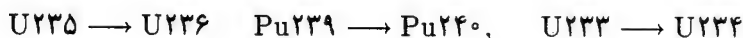
در آغاز عصر هسته ای، این بخش مراحل پس از رآکتور، بی شبهه به اندازه کافی مورد توجه نبوده است، تنها استخراج پلوتونیم برای مقاصد، پیش از هر چیز، نظامی را می توان استثنا دانست. اما اهمیت اقتصادی و اجتماعی این بخش، اکنون که انرژی اتمی اهمیت واقعی خود را یافته است؛ مطرح می شود و برخوردی جدی با مواد شکافت پذیر یا بارآور و حفظ سلامت مردم با دور کردن رادیوآکتیویته و تشعشع به صورتی، بسیار اکید الزامی شده است.

نویدهای رآکتورهای بارآور: روش شکافت هسته ای، چنانچه منحصر به مصرف اورانیم ۲۳۵ باشد، تنها یک راه حل گذرا برای جبران کمبود انرژی است. اما این انرژی پتانسیل، با استحاله

(ترانسمتاسیون) هم‌زمان با شکافت هسته‌های بارآور  $U^{238}$  یا  $Th^{232}$  مربوط به سوخته‌های «مصنوعی»: به ترتیب  $Pu^{239}$  و  $U^{233}$ ، چند برابر می‌شود. همچنین ممکن است (و در تجربه ثابت شده است) که راکتورهایی با نام «بارآور» بیش از مقدار مصرف خود، سوخت تولید می‌کنند. برتری این راکتورها دو چندان است: از یک‌سوی مصرف کامل ذخایر  $U$  و  $Th$  که اصولاً وجود دارد؛ و از سوی دیگر چون راکتورهای بارآور کاربرد سوخته‌های گرانتر را اجازه می‌دهند بنابراین، کانیهای فقیرتر - ذخایر طبیعی بسیار زیادتر می‌شوند.

این آینده از همان سال ۱۹۴۵ با روشنی به چشم می‌خورد. و نیز از همان زمان می‌دانستند که راکتورهای بارآور، دماهایی از بخار در همان ردیف دمای بخار بهترین دیگ را تحمل می‌کنند در صورتی که راکتورهایی که اکنون در بازار رواج دارند چنین نیستند. بنابراین، می‌توان فهمید که چرا برنامه‌های صنعتی کنونی تنها از راکتورهای غیر بارآور سود می‌برند و صرفاً چند ماشین نمایشی یا پیش‌نمونه از نوع بارآور می‌باشند.

علت اصلی چنین وضعی این است که راکتورهای با نوترونهای سریع عملاً تنها راکتورهای بارآور هستند. مدلهایی از راکتورهای با نوترونهای گرمایی می‌توانند مقدار بسیار کمی بیش از مصرف خود، سوخت تولید کنند، گرچه چنین چیزی هنوز در عمل ثابت نشده است. در واقع هسته‌های شکافت‌پذیر با گیر انداختن یک نوترون در همه موارد شکسته نمی‌شوند. ممکن است این نوترون را نگاهدارند و یک هسته شکافت‌ناپذیر تولید کنند



و رابطه گیراندازی روی شکافت برای نوترونهای گرمایی آشکارا بسیار بزرگتر از نوترونهای سریع است. راکتورهای با نوترونهای سریع برای اینکه بارآورهای مؤثری باشند به سوخته‌های دارای غلظت زیاد از هسته‌های شکافت‌پذیر  $Pu^{239}$  و  $U^{233}$  یا  $U^{235}$  نیازمند هستند. بنابراین، سوخته‌های مصنوعی ( $Pu^{239}$  و  $U^{233}$ ) باید در راکتورهای دیگری تولید شده باشند و تنها راکتورهایی که  $U^{235}$  مصرف می‌کنند می‌توانند آن سوختها را خود تهیه کنند. تجمع پلوتونیم، آهسته است (تولید  $U^{233}$  هنوز در عمل انجام نشده است) و بخشی از این عنصر، لااقل موقتاً، در انبارهای سلاحهای هسته‌ای، ذخیره شده‌اند. وانگهی پیشرفت تکنولوژی برای راکتورهای با نوترونهای سریع بسیار دشوارتر است (به علت استفاده از پلوتونیم که در ۱۹۴۰ به تنهایی کشف شد و نیز کاربرد سدیم، گرمابر رواج زیادی ندارد)؛ چنانچه زمانی جامه عمل بپوشد شاید بدون مشکلات خاصی متداول گردد (شکلهای ۱۲۳ و ۱۲۴).

با این همه رواج راکتورهای بارآور ناچار بسیار آهسته خواهد بود. از یکسوی نیازمند وجود راکتورهای قبلی هستند که می‌بایست تا زمانی که از نظر اقتصادی ارزش دارند، لااقل بیست، سی، چهل سال دیگر و یا حتی بیشتر در کار باشند. از سوی دیگر، چنانچه از اتم شکافته شده تعداد  $1/1$  تا  $1/5$  اتم Pu تشکیل شود بخشی از این پلوتونیم در جا مصرف شده است. بهینه اقتصادی لزوماً با بهینه بارآوری، منطبق نیست. بر پایه همه این دلایل راکتورهای بارآور نمی‌توانند لااقل طی ۲۰ سال هم (۱۵ تا ۳۰ سال، برحسب نوع مدل و برآورد) سوخت اولیه خود را بازیابی کنند، مدتی که از دو برابر زمان پیش‌بینی شده - ۱۰ تا ۱۵ سال - برای یک واحد الکتریکی تأسیس شده بیشتر است. سرانجام باید مخالفت‌هایی را هم که با انرژی هسته‌ای بویژه راکتورهای با نوترونهای سریع می‌شود در نظر گرفت، عاملی که بررسی و ساختمان آنها را بویژه در ممالک متحده امریکا، کند کرده است درحالی که برخورد آنها با ذخیره‌سازی اورانیم طبیعی و غنی شده، چنان بالا گرفته است که بزودی نیروگاه‌های هسته‌ای را هم شامل خواهد شد.

نخستین استخراج صنعتی پلوتونیم: در مراحل پس از راکتور، جریان کار با تخلیه عناصر سوخت آغاز می‌شود. خاصیت رادیواکتیوئته این عناصر، پیش از هرچیز برخاسته از فرآورده‌های شکافتی آنهاست که نخست سرعت با ضریب ۱۰ طی چند روز، ۱۰۰ در چند ماه و سپس آهسته کاهش می‌یابد. تنها در این زمان است که می‌توان آن را بی‌آزار کرد، زیرا هر قدر تشعشعات شدیدتر باشد تأسیسات، نیازمندی بیشتری به سپرهای ضخیم و در نتیجه گرانتر دارند و واکنشهای شیمیایی نیز بیشتر احتمال برخورد با واکنشهای رادیوشیمیایی.

در این دوره «خنکسازی»، عناصر سوختی در «حوضهای» با عمق چند متری که آب پیوسته تصفیه‌شونده آنها، امکان جابه‌جا کردن بسیار آسان این قطعات سنگین را می‌دهد و نیز همچون سپری در برابر تشعشع عمل می‌کند، ذخیره می‌شوند.

در ورود به کارخانه بی‌آزارسازی، عنصر سوختی را تکه‌تکه می‌کنند و مدادها را از آنها جدا می‌سازند. سپس خود عنصر سوختی را از غلافش بیرون می‌آورند؛ این کار یا از راه شیمیایی یا به‌طور مکانیکی، یا پیش از و یا در جریان انحلال قبل از جدا کردن پلوتونیم انجام می‌گیرد.

پلوتونیم که تنها عنصر مصنوعی مورد استفاده یک صنعت مهم است در سال ۱۹۴۰ در پرتو یک ایزوتوپ ۲۳۸، با نیم عمر کوتاه (۸۶/۴ سال) خود شناخته شد. خواص شیمیایی آن نخست با این ایزوتوپ، که چند میلیارد گرم از آن در دست بود تعیین شد. بعدها بررسی آن را با تکنیکی که از میکروبیولوژی گرفته شده بود ادامه دادند، که بررسیهای شیمیایی را زیر میکروسکوپ،

روی نمونه‌هایی با جرم چند ده میلیون گرم از ایزوتوپ  $^{239}$  انجام می‌دادند. این ایزوتوپ از تأثیر نوترونهایی که بوسیلهٔ سیکلوترون تهیه شده بودند، بر اورانیم به‌دست آمد. نتایج این تحقیقات، مهندسان شرکت دویون دونمور را بر آن داشت که یک کارخانهٔ استخراج طرح و تأسیس کنند که در آن اواسط سال ۱۹۴۵ میله‌های پیلای هفرد<sup>۱</sup> چند کیلوگرم پلوتونیم تحویل دادند.

اینکه این کارخانه بخوبی هم کار کرده است پیروزی خارق‌العاده‌ای است. نه تنها این پیروزی بدون «کارخانهٔ آزمایشی» به‌دست آمد و بزرگترین جهشی که در صنعت شیمی شناخته شده است (از چند میکروگرم به چند کیلوگرم)، بلکه همچنین این کارخانه باید کاملاً از دور اداره شود و پس از آغاز کار، تنها در شرایط بسیار دشوار، دست‌کاری آن ممکن است.

کارخانه‌های جدید، با این کارخانه بسیار تفاوت دارند و تنها وجه مشترک این دو، اداره آنها از دور، و از پشت سپرهای ضخیمی است که در برابر تشعشعات حائل می‌شوند و نیز دشواری دست‌کاری یا ایجاد تغییرات مهم در آنها، به‌مناسبت خطر تشعشع است. پلوتونیمی که در اورانیم پیلای تشکیل می‌شود ناگزیر همراه تکه‌هایی از شکافته‌هایی است که بشدت رادیواکتیو هستند.

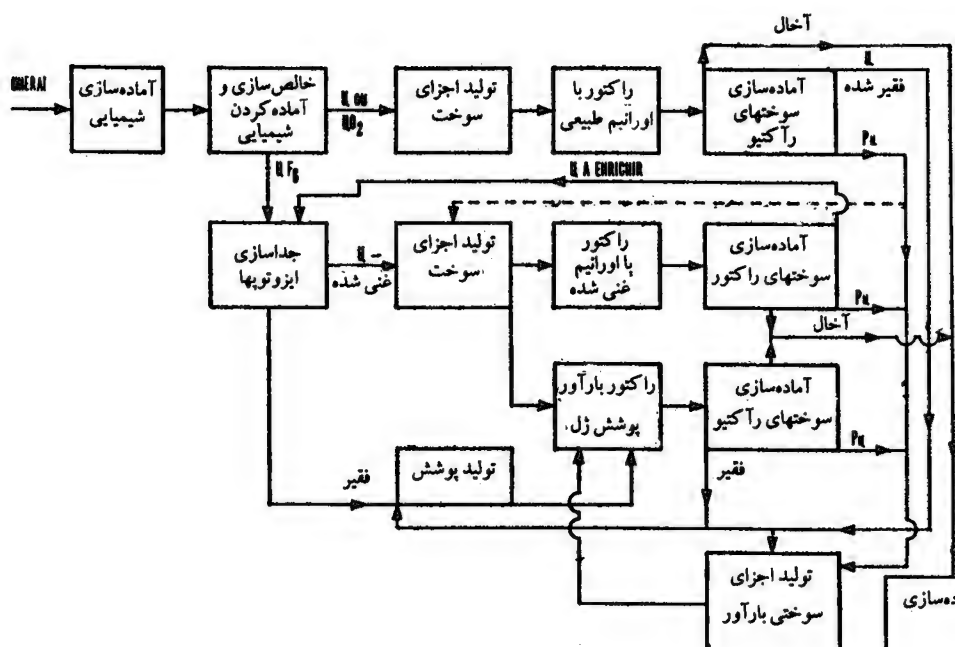
برای اینکه قاعده‌ای از مقادیر به‌دست دهیم راکتوری با اورانیم طبیعی یا کمی غنی شده را در نظر می‌گیریم که سوخت آن پیش از آنکه عوض شود مقدار ۱۰ هزار تا ۲۰ هزار  $\text{MWj/t}$  تولید می‌کند. بدین ترتیب در هر سال هر تن اورانیم محتوی در آن، چند کیلوگرم پلوتونیم تولید می‌کند. بنابراین چنانچه سوخت را پس از یک سال کار درمان کنند، هر تن آن علاوه بر وزن اورانیم خود (۱ تا ۲٪) که ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم می‌شود که در شکافت هسته‌ای مصرف می‌شد - حدود یک  $\text{MWj}$  در هر گرم - و درصد ۲۳۵  $U$  به‌طور محسوسی کاهش می‌یافت) و چند کیلوگرم پلوتونیم، ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم فراورده‌های شکافتی خواهد داشت که رادیواکتیویتهٔ کل آن، دقیقاً در زمان توقف راکتور، حدود چند میلیارد کوری (واحد رادیواکتیویته که برابر مقدار رادیواکتیویته‌ای است که یک گرم رادیم از خود نشان می‌دهد) خواهد بود.

روشهای جداسازی: کار جداسازی بر پایهٔ این واقعیت است که اورانیم در شکل ۶ والانس خود پایدار است، درحالی‌که در محیط خنثی یا کمی اکسند، پلوتونیم، سه یا چهار والانس است.

از محلول نیتریکی سوخت، اورانیم و پلوتونیم را در حلالی آلی استخراج می‌کردند، و تقریباً کل فراورده‌های شکافت در محلول آبی باقی می‌ماند. بعداً پلوتونیم را با عملیات اکسندگی و احیای متناوب، که امکان به‌کارگیری تراسبهای انتخابی، یا استخراج‌هایی به کمک حلالها و بالاخره تثبیتها و شست‌وشو با تبادلگرهای یونی را فراهم می‌سازد، از اورانیم جدا می‌کنند. این عملیات تکرار می‌شوند و برحسب مورد طوری اجرا می‌شوند که بازده و خلوص متناسب به‌دست آید. در اصل با روشها و تکنیک‌هایی که در مراحل پیش از راکتور، برای اورانیم گفته شد، سروکار داریم. اما در اینجا به کارگیری‌هایی فرمان از دور، تأثیر تشعشعات بر همه اجزای شیمیایی و بر همه مواد وارد در واکنش و لزوم مبرم جلوگیری از گسسته شدن تصادفی یک واکنش زنجیری در کارخانه، اکیداً باید رعایت شوند. اما اگر اورانیم طبیعی در شیمی خشک یا محلول در آب معمولی آمادگی باید این خطر وجود ندارد؛ درحالی‌که این خطر در سیستمهای اورانیم طبیعی - آب سنگین، یا چنانچه سوختهای غلیظ شده در کارخانه‌های جداسازی ایزوتوپها، نظیر آماده‌سازهای سوختها، عمل آورده شده باشند، وجود دارد. برای رفع این خطر، غلظت محلولها را محدود می‌کنند؛ برای این کار ظرف‌هایی می‌سازند که حجم و شکل آنها (رابطه بزرگ سطح به حجم)، امکان رسیدن به حالت بحرانی را ندهند؛ با گذاردن پرده‌های ناتراوایی نسبت به نوترون، نظیر ورقهای آهنی کادمیم‌دار، در بین یا اطراف آنها بدین هدف دست می‌یابند (شکل ۱۲۵).

بازار دادوستد پلوتونیم هنوز به سطح عادی نرسیده است. کارخانه‌های آماده‌سازی سوخت، تا امروز، در مالکیت دولت هستند و هزینه آماده‌سازی آنها برای دارندگان راکتورهای با آب، حدود ۸۰۰ فرانک برای هر کیلوگرم است. در ممالک متحده آمریکا، پلوتونیمی که به‌دست می‌آید، دولت به‌بهای هر گرم در حدود ۵۰ فرانک می‌خرد و در بازار سیاه، پلوتونیم به‌بهای پنج برابر فروخته می‌شود. ظرفیت آماده‌سازی کنونی جهان، تکافوی تولید روزافزون برق هسته‌ای را نمی‌کند و باید بی‌درنگ به ساختن کارخانه‌ای دیگر همت گماشت.

ایزوتوپهای پلوتونیم: پلوتونیم ۲۳۹ همین‌که در پیل تشکیل شد نوترون‌ها را جذب می‌کند. بعضی از این نوترون‌ها آن را می‌شکافند و فراورده گرمای هسته‌ای به نگهداری آن کمک می‌کند. نوترونهای دیگر گیر می‌افتند و پلوتونیم ۲۴۰ تشکیل می‌شود. تا مدتها، عنصر پلوتونیم پس از تشکیل در پیل می‌ماند و از ایزوتوپ ۲۴۰ غنی می‌شد. این ایزوتوپ برای انفجار پلوتونیم زیان داشت به‌طوری‌که درحال حاضر از ورود آن به گستردگی جلو می‌گیرند. بنابراین تولید پلوتونیم «انفجاری» می‌تواند مدت اقامت میله‌های اورانیم در پیل را محدود سازد درحالی‌که اگر بخواهند پلوتونیم «راکتوری» یا



شکل ۱۲۵. اصول چرخه سوخت اورانیم - پلوتونیم.

چرخه توریم - اورانیم ۲۳۳، شبیه بالاست، جز اینکه باید با وارد کردن توریم (که نوترونهای کند آن را نمی‌شکافند) در راکتوری با اورانیم یا پلوتونیم آن را تحریک کرد.

پلوتونیم «سوختی» که می‌تواند تا ۳۰٪ دارای پلوتونیم ۲۴۰ باشد تولید کنند، ممکن است، تا مدتها آنها را در پیل نگاهداشت.

پلوتونیم ۲۴۰ نیز بنوبه خود، به دنبال گیراندازی نوترونها، پلوتونیم ۲۴۱ می‌دهد که نوترونهای کند آن را می‌شکافند، و سپس پلوتونیم ۲۴۲ ایجاد می‌شود. ترکیب ایزوتوپی پلوتونیم موجود در سوخت، همچنین مقدار کل آن طی زمان همراه چگالی و طیف نوترونی در هر نقطه، تغییر می‌کند. بنابراین نوعی پیچیدگی چشمگیری در این تغییر، همراه با زمان، از خصوصیات نوترونی وجود دارد که سازنده و استفاده‌کننده راکتور باید آن را دقیقاً در نظر داشته باشد.

آخال رادیوآکتیو: عناصر پلوتونیم و اورانیم همین‌که جدا شدند (گاهی هم عده‌ای از عناصر پس از پلوتونیم مفید) فضولاتی از عملیات آنها می‌ماند که بشدت رادیوآکتیو هستند. پیش از آنکه آنها را به

تفصیل شرح دهیم باید آخال ویژه صنعت هسته‌ای را در کل معرفی نماییم؛ صنعتی که رادیواکتیویته و گوناگونی بی‌شمار صفات شیمیایی و حالت‌های فیزیکی از ویژگی‌های آن است.

آخال کم رادیواکتیو: بعضی مواد «بی‌آزار» استخراج معدنی، باقیمانده‌های عملیات گوناگون آزمایشگاه‌ها، آب‌وهوای بعضی مدارهای فرعی کارخانه‌های هسته‌ای و غیره، کمی آلوده به رادیواکتیویته هستند. زمانی که مقدار رادیواکتیوی آنها بسیار کم است یا (و) سرعت مقدار آن کاهش می‌یابد، و بنابراین مقدار آن در زمینهای مجاور کارخانه از محدوده مقرر تجاوز نمی‌کند و از کنترل خارج نمی‌شود می‌توان آنها را آزاد گذاشت تا در اطراف پخش شوند. گاهی هم آنها را در زمینهای اطراف کارخانه دفن می‌کنند تا رادیواکتیو و نیز اطراف آنها تحت کنترل باشد.

اما بیشتر اوقات آنها را باید زیر نظر انبار کرد. برای این کار، آخال جامد را روی هم انباشته می‌کنند. آنها را کاملاً تا اندازه‌ای که حالت شبه جامد بپایند تبخیر می‌کنند. همه این اقدامات، با احتیاط تمام، برای تهیه یک جسم نهایی - تا حد امکان از نظر شیمیایی خنثی - انجام می‌گیرد. سرانجام این جسم را در محفظه آب‌بندی شده‌ای (از فلز یا بتون) می‌گذارند و در جایی قرار می‌دهند که بتوانند تشعشعات آن را پیوسته کنترل کنند؛ حالت این محفظه‌ها و در صورت لزوم مقدار رادیواکتیویته آنها، که از محل ذخیره می‌گذرند باید تحت کنترل باشند. در چنین حالتی اگر محفظه کمی هم آسیب ببیند زیاد مهم نیست؛ در واقع، کمی رادیواکتیویته، لختی شیمیایی و جامد بودن محتوی آن در تمام مدت تأثیر دارند. در واقع آخال از این دست آن قدر کم خطرناک هستند که چندین بار آنها را در اعماق دریا ریخته‌اند. این کار، که اکنون برای احترام به برخی اعتراضات، بر مبنای امکان تغلیظ آهسته و انتخابی عناصر پرتوزای در طول دورانی از سراسر «زنجیر تغذیه» که از آب و ته‌نست‌ها به پلانکتونها، به جلبک‌ها به ماهی‌ها و بالاخره به انسان پایان می‌پذیرد، محدود است؛ زمانی که نظرات دقیق‌تر و عموماً آگاهانه‌تر شوند، احتمال دارد شدت گیرد.

آخال پر رادیواکتیو: اما، شماری از عملیات هسته‌ای، ایجاد آخال با رادیواکتیویته قوی می‌کنند، این آخال باید با احتیاط تمام دست‌کاری و کم خطر شوند. نخست، مهمترین فراورده‌ها، آنها، هستند که به چرخه سوخت بستگی دارند و مهمترین این فراورده‌ها نیز فراورده‌های شکافت هستند. اما فراورده‌های مهم دیگری نیز وجود دارند، مثلاً غلاف‌های عناصر سوختی که از راکتور تخلیه می‌شوند و غالباً آنها را به‌طور مکانیکی از خود جدا می‌کنند. این غلاف‌ها نه تنها دارای ایزوتوپ‌هایی هستند که بوسیله نوترون‌ها در جرم آنها تشکیل شده‌اند، بلکه کمی هم از سوخت، چسبیده به آنها مانده است.



عنصر رادون که از کانه‌ها می‌گریزد باید به کمک هوادهی شدیدی از سرسرای معدن بیرون رانده شود. پس از تهویه، به علت لختی زیاد شیمیایی و عمر بسیار کم آن، می‌توان آن را آزاد گذاشت تا در هوا پراکنده شود (و در آنجا خاک از راههای گوناگون به مقدار قابل توجهی، پیوسته بدان تزریق می‌شود). هوایی که از نزدیک یک راکتور می‌گذرد مقداری  $^{14}\text{C}$  دارد که از واکنش  $^{14}\text{N}(n, p)$  و نیز  $^{41}\text{A}(n, \gamma)$  از  $^{40}\text{A}(n, \gamma)$  و  $^{85}\text{Kr}(n, \gamma)$  و  $^{84}\text{Kr}(n, \gamma)$  نتیجه شده است. با در نظر گرفتن بخصوص عمر دراز عنصر اخیر نمی‌توان آن را فایزالبال در هوا رها کرد تا بدین ترتیب تغییر یافته و از نو وارد هوا شود. احتیاطهای لازم فراتر از این نوع نگاهداری زودگذر، ایجاب می‌کند که آن را در یک حجم واسط وارد کنند تا کاهش رادیواکتیویته کم عمر امکان یابد و کریپتون از آن جدا شود (مثلاً از راه جذب سطحی در دمای پایین)، سپس آن را انبار کند. چنانکه دیده می‌شود با مشکلات گوناگونی سروکار داریم که در اینجا به آوردن چند مثال بسنده می‌کنیم.

فراورده‌های شکافتی: به فراورده‌های شکافتی بازگردیم. آنها شامل حدود  $200$  ایزوتوپ هستند که بین عددهای جرمی  $70$  و  $160$  و بین عددهای اتمی  $30$  و  $65$  توزیع شده‌اند. این اعداد تغییر کمی دارند و همچنین فراوانی نسبی هستک (نوکلید)های گوناگون، برحسب هسته شکافته شده و انرژی نوترون. در اینجا بویژه عناصر:  $43$  تکنسیم و  $61$  پرومتیم وجود دارند که نه ایزوتوپ پایداری دارند و نه ایزوتوپ رادیواکتیو با طول عمری که در طبیعت یافت می‌شوند. در اینجا همچنین می‌توان با گازهای کمیاب روبه‌رو شد که بیش از  $10\%$  کل را تشکیل می‌دهند و وجود آنها انگیزه دشواریهای ویژه‌ای چه در زمینه تعریف عناصر سوختی (همان‌طور که دیدیم) و چه در زمینه آماده‌سازیهای شیمیایی است. این فراورده‌های شکافتی در تقریباً کل خود، رادیواکتیو هستند و باید برای گذر از فراورده اولیه به یک ایزوتوپ پایدار، یک تا پنج رادیواکتیویته پیاپی را شاهد بود.

رادیواکتیوی که بزرگترین عدد را در فراورده‌های شکافتی دارد و عمر آن نیز کوتاه است عملاً در جریان تغییرات شیمیایی سوختهای هسته‌ای ناپدید می‌شود. اما با این همه، آنهایی که عمرشان میان چند ماه تا چند ده سال است، منبع دیرپای و پر قدرت رادیواکتیو می‌باشند.

در راکتوری که به مدت یک تا سه سال با قدرت  $P$  کار کرده است، قدرتی که صرف فراورده‌های شکافت شده است، این قدرت، سه ماه پس از توقف، حدود  $10^{-6}$  می‌باشد، سپس با آهستگی تمام کاهش می‌یابد. این واقعیت زمانی که با زبان رادیواکتیویته سخن می‌گوییم، چنین است: سه

ماه پس از توقف، برای راکتورهای با دل دارای قدرت  $1000 \text{ MWe}$  به طور کلی  $10^7$  کوری یا یک تا دو کوری برای هر گرم سوخت می باشد.

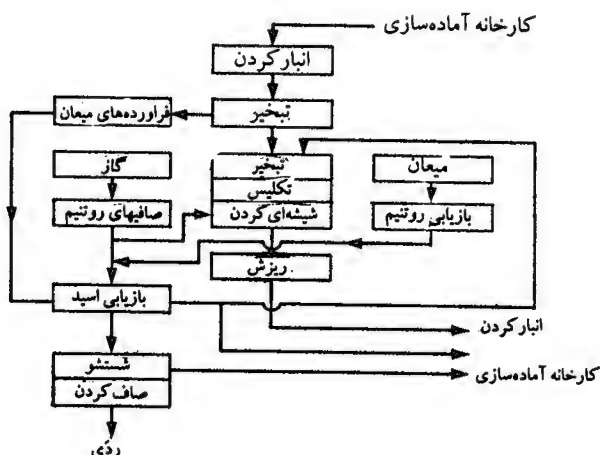
بیشتر آخال پر اکتیویته، محلول نیتریک این فراورده هاست که باید برای مدت ها تحت مراقبت شدید، آن را نگهداری کرد.

در حال حاضر این محلول را به شکل مایع (گاهی هم پس از تبخیر جزئی برای کم کردن حجم آن) در ظرف های بزرگ با گنجایش  $100$  تا  $1000$  متر مکعبی از جنس فولاد زنگ ناپذیر نگهداری می کنند. این ظرف ها باید خنک نگاه داشته شوند تا گرمای برخاسته از رادیواکتیویته برطرف شود. اطراف این ظرف ها باید سپرهایی گذاشته شود تا از عملیات کنترل و نگهداری اطمینان باشد. برای احتیاط از نشتی بودن ظرف و جلوگیری از آلودگی محیط اطراف آن، ظرف را دوجداره می سازند و یا لایه ای طوری آن را جا می گذارند که همه مایع ناپدید شده را بتوان از نو به دست آورد. به تعدادی ظرف های کمکی، شبکه ای از لوله ها، تلمبه ها، ابزار اندازه گیری و غیره نیاز است. این نوع انبارداری، به علل هزینه و جاگیری زیاد، تنها می تواند موقتی باشد. این واقعیت که سهل انگاری موجب ناپدید شدن حجم بزرگی از این محلول ها می شود، نظر بالا را تأیید می کند. معلوم شده است که خاک یک تبادلگر عالی یون هاست و فراورده های زیان بخش را مدت ها در خود نگاه می دارد تا وارد آب های مجاور نشوند. اما نباید با تکیه بر این خاصیت خاکها آسوده خاطر بود.

محافظت از آخال فعال: هنوز هیچ محلولی به طور قطعی پذیرفته نشده است. اما چندین محلول بررسی شده و بعضی هم مورد آزمایش قرار گرفته اند.

خصیصه مشترک این محلول ها، کاهش حجم و وارد کردن آخال در بدن اجسام جامدی است که خوردگی آنها بوسیله آب بسیار کم است. زیرا در نظر است تا این گونه قطعات را بتوانند در لفافه های (فلزی یا بتونی عاری از فراورده های رادیواکتیو)، بدون هیچ گونه آماده سازی، برای چند ده سال و حتی یک سده، نگهدارند. این کار تنها با خنثی کردن، تبخیر و داخل کردن، تبخیر و داخل کردن گردها یا محلول های بسیار غلیظ در جسم بتونها، شیشه ها، یا (و) اجرام آسفالتی عملی است. بدون اینکه این روش ها را به تفصیل بیان کنیم می توان بدرستی پیشگویی کرد که همه آخال دارای رادیواکتیویته زیاد که از یک راکتور  $1000 \text{ MWe}$  نتیجه می شوند می توانند سالانه حجمی برابر  $1$  تا  $3$  مترمکعب داشته باشند (شکل ۱۲۶).

بدین ترتیب، می توان این قطعات را، بدون هیچ گونه تماسی با آب، در انبار های زیر مراقبت طوری نگاه داشت که آنهایی که عیبی از خود نشان می دهند بیرون آورده شوند و مطمئن بود که



شکل ۱۲۶. نمایه شیشه‌ای کردن آخال هسته‌ای پر رادیوآکتیو.

هرگز محیط را آلوده نخواهند کرد. اما در دراز مدت، این امر متضمن جاگیری زیاد و هزینه‌ای است که برای کاهش آن کوشش می‌شود و بنابراین برای یافتن روشهایی جهت «ناپدید کردن آخال» کوششهای به عمل آمد تا روشهایی که بدون اینکه ازدیاد ذخایر مرئی و تحت مراقبت را دربر داشته باشد اطمینان کامل را ایجاد کند. پیشنهاد فرستادن این آخال به فضای بیرون از میدان گرانش زمین، شدنی نیست، زیرا هم هزینه آن زیاد است و هم خطر اشتباه در پرتاب وجود دارد. ما این را تأکید می‌کنیم، زیرا حتی ممکن است کار ناپخته‌ای انجام گیرد و مسأله را دشوارتر سازد. باید گفت برای سود گرفتن از تابشهای رادیوآکتیو جهت گرم کردن قطعات نیز فکر شده است. این قطعات را در چاه قرار می‌دهند، خاک زیر آنها ذوب می‌شود و قطعات در خاک دفن می‌گردند و روی آنها را لایه نفوذناپذیری از سنگ ایجاد شده می‌پوشانند. نخستین اقدام در این راه، در لایه‌های یخ دارای ضخامت چندین کیلومتر گزارش شد که در گروئنلند و در قاره جنوبگان (آنتارکتیک) در دشتی بازالتی قرار دارند. دوری این نواحی، احساس امنیت القا می‌کند اما حمل و نقل آن گران و پر دردسر است.

شاید - بی‌شبهه، انسان چنین می‌اندیشد - که روش دفن کردن بعدها عملی شود. اما اکنون با نداشتن اطلاعات کافی از محتویات این قطعات و گردش آهسته آبهای زیرزمینی ژرف نمی‌توان این روش را به کار گرفت.

تنها چیزی که هم اکنون عملی به نظر می رسد دفن این قطعات در لایه های نمک است. لایه های نمک با ضخامت زیاد در کشورهای متعددی و در عمق متوسط وجود دارند. خود وجود آنها و به تجربه سده ها در استخراج آنها ثابت می کنند که آنها در فرماسیونهایی از زمین شناسی یافت می شوند که گردش آب در آنها از هزارها سال پیش قطع شده است. گفته می شود که بدین توده ها، بویژه به معدنهای متروک آنها بخوبی می توان اعتماد کرد. در این معادن می توان سالنهایی ایجاد کرد که خاک نمکین چاههای آن، قطعات آخال را دربرگیرد، اما به شرطی که کار دفن آنها، این بار، بدون نقشه و طرح نباشد. طرحهای مشخص این کار آماده هستند اما عملی کردن آنها، بدون اینکه مردم و مقامات محلی به بی زیان بودن آن قانع شوند محال است.

ساخت انبارهای موقتی تحت مراقبت فعلاً تنها امکان موجود است.

در دراز مدت، رادیواکتیویته آخال هسته ای تنها در ذراتی از پلوتونیم باقی خواهد ماند؛ این ذرات از مرحله آماده سازی گریخته اند و در مقدار کمی از عناصر پس از پلوتونیم با عمر زیاد وجود دارند و ذرات  $\alpha$  انتشار می دهند. می توان درباره جداسازی شیمیایی آنها هم اندیشید و آنها را به فرآورده هایی با عمر کوتاه تبدیل کرد (از راه شکافت هسته ای یا گیراندازی نوترونی). برای این کار آنها را در راکتورها در معرض برخورد های نوترونی قرار می دهند. باز هم باید از طرحهایی یاد کرد که اصول آنها در حال بررسی است اما عملی کردن احتمالی آنها در حال حاضر، صرفاً بمنظور یادآوری است.

به کارگیری بعضی آخالها: بعضی از آخالهای بسیار گوناگون، که ما جمع آنها را بررسی می کنیم، فوایدی دربر دارند. اینها ایزوتوپهایی هستند که در ابزارهای اندازه گیری برای پژوهشهایی به کار گرفته می شوند یا در تجهیزاتی که از انرژی تشعشعی آنها برای گرم کردن استفاده می شود و نیز در مولدهای ترموالکتریکی (دستگاههای شوک قلب، بویه های اقیانوسها، ابزارهای فضا نوردی) به کار می روند. اما همگی این کاربردها تنها بخش بسیار کوچکی از این فرآورده ها را مورد استفاده قرار می دهند. می توان کاربرد تشعشع را مثلاً برای فرایند صنعت رادیوشیمیایی (پولیم سازی، استریل کردن و ...) در نظر گرفت. این زمینه هم مصرف چندانی ندارد، گرچه آزمایشهایی امکان سود بخشی را نشان می دهند. همه این موارد هرگز از ناگزیری انبار کردن نهایی آخالها چیزی کم نمی کنند.

سرانجام آخالهای هسته ای را می توان همچون کانه های عناصر کمیاب دانست.

بدین ترتیب زنجیره فرآورده های شکافتی با عدد جرمی ۱۰۱ به ۱۰۶، ۱۰۸ و

۱۱۰ با ایزوتوپها پایدار فلزات گرانبهای روتنیم، رودیم و پالادیم پایان می یابند. بازده

کل آنها در حدود ۵٪ است، یعنی حدود ۲۵ گرم در هر کیلوگرم فراورده‌های کلی. یک رآکتور ۱۰۰۰ MWe (یا ۳۰۰۰ MWth) در سال ۷۰۰۰ ساعت کار می‌کند و حدود ۲۰ کیلوگرم در سال تولید دارد. در یک قدرت کلی مربوط به پایان این سده، حدود ۱۰<sup>۶</sup> MWe یا حدود ۲۰ تن در سال از آن به‌دست می‌آورند (تولید کنونی این فلزات در سال به ۱۰۰ تن نمی‌رسد).

تشعشعات و ایمنی: تمام آنچه گفته شد این واقعیت را تأکید می‌کند که انرژی هسته‌ای، جوامع ما را در برابر مشکل مهمی قرار داده است و آن: حفظ سلامت مردم در برابر تشعشع است. از آغاز این سده با اکتشافات پیاپی اشعه X، رادیواکتیویته، تشعشعات کیهانی و کاربردهای دو اکتشاف نخستین در عمل، این مشکل شناخته شد. اما انرژی هسته‌ای هم‌اکنون و در آینده نیز به مقیاس وسیعی روی درگسترش دارد، این گسترش در شدت، شمار و پخش منابع تشعشع است. محقق است که همه اینها در ساختمانها جای دارند. وانگهی آنها را مجموعه‌ای از مقررات و روشهای کاربردی، محافظت و مراقبت می‌نمایند. با همه آنها «وحشت بزرگی» در دلها موج می‌زند که برخاسته از: خاطره معایب عملیات جنگی و انفجارهایی است که ورود انرژی هسته‌ای را به جهانیان اعلام داشتند؛ نادانی کلی از این انرژی و تکنولوژی نوین آن و به‌طور کلی ارزیابی خطرهای آن برای جریان عادی زندگی؛ ترس از نوآوردها و این واقعیت انکارناپذیر که این شیاطین، که تا مدتها حضور خواهند داشت، در اثر تشعشعات بسیار ضعیف هم تحریک می‌شوند و نه تنها به خود افراد تحت تشعشع آسیب می‌رسانند بلکه نسل آنها را آلوده می‌سازند. مقررات جهانی سقف و حداکثر مقداری را که هرکس می‌تواند هم در کوتاه‌مدت و هم در همه زندگی خود آن را دریافت دارد تعیین کرده است به بیان انرژی، اندازه آنها بسیار کم است. در واقع خوراک حداکثر سالانه نیم Rem است که تقریباً برابر  $10^{-5} \text{ J/g} \times 0.5$  می‌شود که برای یک شخص ۶۰ کیلوگرمی کمتر از ۰/۱ کالری است، که برای اینکه ایجاد سوختگی کند بسیار کم است. اما زمانی که تمام بدن برای لحظه‌ای تحت تشعشع ۵۰ rem قرارگیرد به احتمال ۵۰٪ طی چند هفته خواهد مرد.

از سوی دیگر، باید چند واقعیت اساسی را خاطرنشان ساخت:

تشعشعات جزئی شدید بخوبی تحمل می‌شوند، مثلاً ۲۰ rem در رادیوگرافی لوله گوارش، بدون اینکه از صدها rem سخن بگوییم که در درمان بعضی سرطانها اعمال می‌شوند؛ تابشهای کیهانی و رادیواکتیویته خاک به‌طور متوسط در سال ۰/۱۲۵ rem می‌دهند که برحسب ارتفاع که در جذب تابشهای کیهانی از راه هوا مؤثر است و نوع خاک و خانه که کم‌وبیش رادیم دارند از ۰/۸

جدول ۴: ارقام اقتصادی صنعت هسته‌ای در سال ۱۹۷۷

پیش‌بینی مدت ساخت/مدت استفاده به سال		پیش‌بینی مدت قابل استفاده به سال		ظرفیت الکتریکی سرمایه ثابت		ظرفیت		نوع تأسیسات	
۶-۱۰	۳۰-۴۰	۰,۰۷۵F/kWh	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰ MWe	نیروگاه هسته‌ای			
۵-۱۰	۱۰-۲۰	۲۰۰-۳۰۰ فرانک برای هر کیلوگرم $U+Pu$	۵۰۰	۹۰۰۰	۲۰۰۰۰ تن در سال $U+Pu$	مدن و کارخانه آماده‌سازی کانه‌ها			
۳-۵	۱۵-۲۵	۱۵-۲۰ فرانک هر کیلوگرم $U$	۲۵۰	۲۵۰۰۰	۵۰۰۰۰ تن در سال $U$	خالص کردن و (یا) تبدیل به $UO_2$			
۷-۱۰ ۵	۲۰-۴۰	۴۸۰ فرانک هر کیلوگرم UTS	۱۵۰۰۰ ۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰ ۳۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰ UTS ۳۰۰۰۰ UTS	کارخانه جداسازی ایزوتوپها: با روش دیفوزیون (نفوذی) با روش مرکزگریزی	تولید مواد سوختی: راکتور با آب $UO_2$ $UO_2 + PuO_2$		
۳-۵	۱۵-۲۵	۶۰۰-۸۰۰ فرانک هر کیلوگرم $U$ ۱۵۰۰ فرانک هر کیلوگرم $U+Pu$ ۴۰۰-۵۰۰ فرانک هر کیلوگرم $U+Pu$	۵۰۰ ۱۰۰۰ ۵۰۰	۵۰۰۰۰ ۵۰۰۰۰ ۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰ تن در سال $U$ ۱۵۰۰۰ تن در سال $U+Pu$ ۱۵۰۰۰ تن در سال $U+Pu$	راکتور با نوترون سریع (دل) $UO_2 + PuO_2$			
۵-۷	۱۵-۲۵	۱۰۰۰-۱۵۰۰ فرانک هر کیلوگرم $U$ ۲۵۰۰ فرانک هر کیلوگرم $U+Pu$	۵۰۰۰ ۵۰۰۰	۵۰۰۰۰ ۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰ تن در سال $U+Pu$ ۳۰۰۰۰ تن در سال	آآماده‌سازی شیمیایی سوخت: راکتور با آب راکتور سریع (دل + پوشش)			
۱-۲	۵۰	۵۰ فرانک در سال هر کیلوگرم $U$ ۷۵-۱۵۰ فرانک هر کیلوگرم $U$	۱۵۰	۲۰۰۰۰	۱۵۰۰۰ تن	انبار کردن حمل و نقل			

۱. این ظرفیت برای همه عمر یک راکتور با آب تحت فشار حساب شده است، چنانچه تنها بار اولیه سوخت را حساب کنند، این اعداد باید بر ۳ تقسیم شوند.

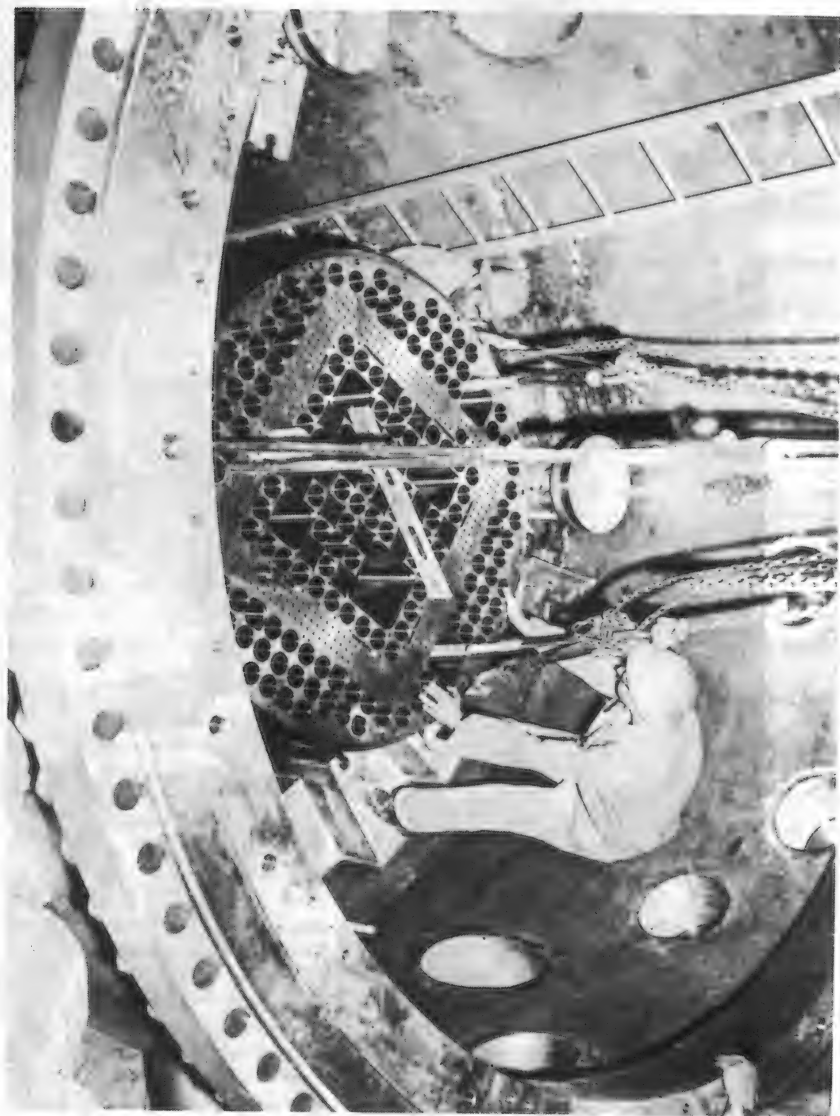
تا ۰/۴ یا حتی ۰/۵ تغییر می‌کنند؛ سهم صنعت هسته‌ای در میدان تشعشعات، که انسان از آغاز پیدایش در آن شناور است؛ اکنون بخش بسیار کوچکی (۱ تا ۲٪) نه تنها از میانگین این میدان، بلکه همچنین تغییرات آن را، که در بالا گفته شده‌اند، تشکیل می‌دهد.

سهم متوسط ۱۰٪ این میانگین وابسته به کاربردهای پزشکی، تشخیص و درمان با اشعه است، که هیچ‌گونه آثار کلی قابل مشاهده‌ای ندارند.

همه اینها نوعی صنعت هسته‌ای را شامل می‌شوند که معمولی کار می‌کند؛ جز پیشامدهای کوچک، با حوادث دیگری برخورد نمی‌کند؛ نشأت قابل توجه رادیوآکتیو به بیرون از پوشش آن وجود ندارد. خطرات یک حادثه بزرگ ناشی قابل درک است. نتایج چنین حادثه‌ای با آثار برخاسته از شکستن یک سد، وقوع یک زلزله یا مصیبت‌های دیگر طبیعی قابل مقایسه است. اما احتمال وقوع چنین حوادثی بسیار کم است. مثلاً در یک رآکتور با آب سنگین  $1000\text{ MW}$ ، احتمال وقوع چنین حوادثی برابر  $10^{-6}$  است. اما این اظهارنظرها، بسیار تقریبی هستند، بویژه که فاقد (خوشبختانه) تجربه ملموس هستیم.

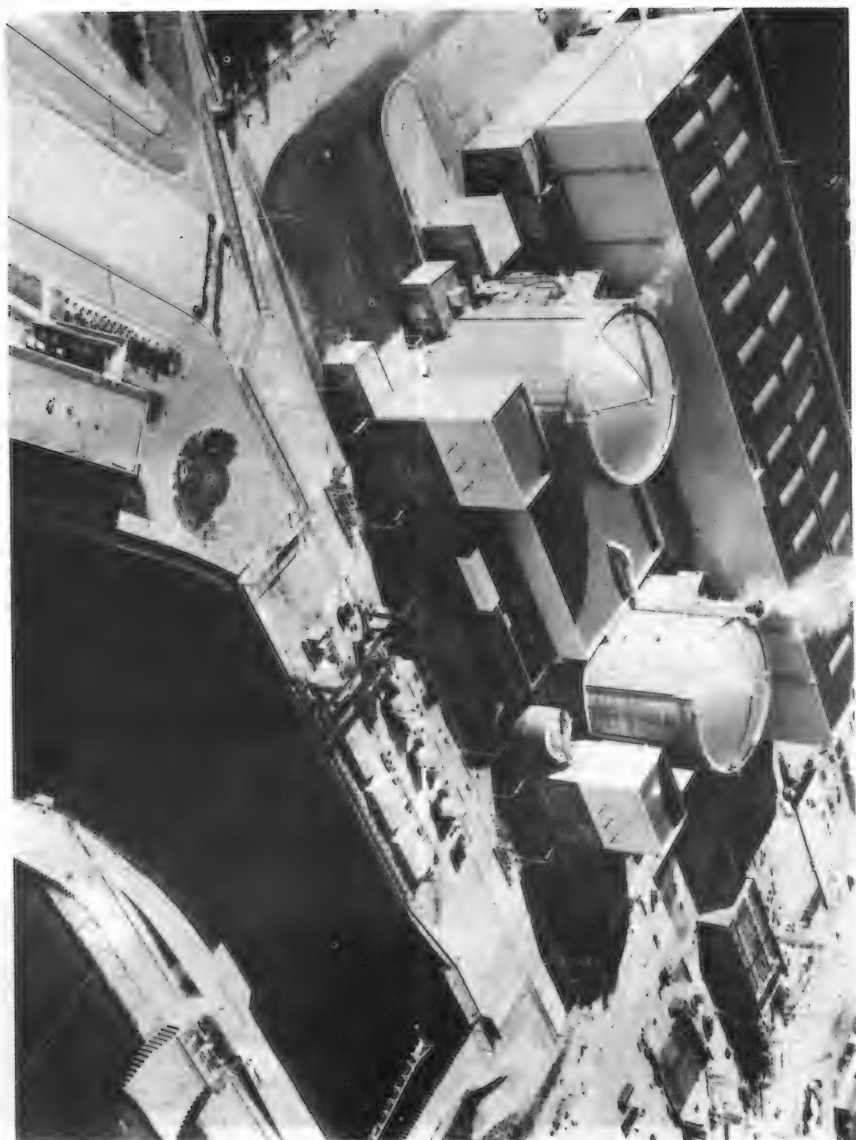
در اینجا نمی‌توان مطلب را بیش از این به درازا کشانید. هیچ چیز لزوم هشجاری بسیار زیاد را نفی نمی‌کند. این هشجاری نه تنها برای کارشناسان و کارکنان این صنعت ناگزیر است بلکه مردم عادی نیز باید هشیار انتقال، ساختمان، کار و مقررات صنعت هسته‌ای باشند. همچنین باید به کوششهای خود برای پژوهش بیشتر نه تنها در محدوده تکنیک و ایمنی هسته‌ای استمرار داد بلکه این تلاش باید در زیست‌شناسی تشعشعات و همه جوانب هسته‌ای در بوم‌شناسی به عمل آید؛ و نیز باید در آموزش و آگاه ساختن مردم در این زمینه فعال بود؛ فعالیت اخیر را می‌توان در ردیف کوششهایی دانست که پس از کار پاستور در میکروپوشناسی، در جهت بهداشت مردم به عمل می‌آید.

از آنچه گفته شد چنین برمی‌آید که همه افراد باید درباره آینده صنعت هسته‌ای آموزش ببینند و از خود عقیده‌ای داشته باشند. چنین می‌نماید که مؤلف این اثر نباید عقیده خود را پنهان کند: پیشرفت سریع این صنایع نه تنها ناگزیر می‌نماید بلکه امیدبخش است؛ چنین باوری با در نظر داشتن اهمیت منابع دیگر انرژی اولیه ابراز می‌شود.



تابوی ۱۳. راکتور هسته‌ای با آب جوش، Idaho Falls.





تابلوی ۱۴. نیروگاه اتمی Fessenheim (۱۹۷۷).

- ARMENGAUD (J.), *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, 3 vol., Paris, 1861-1862.
- AUGUSTIN-NORMAND (P.), *La genèse de l'hélice propulsive*, Paris, 1962 (Académie de marine. Communications et mémoires).
- *Les origines des chaudières à circulation accélérée* (1825-1885), Paris, 1929 (extrait de la *Revue maritime*).
- BARJOT (R.), Les chemins de fer, dans *La locomotion moderne* (ouvrage collectif), Paris, 1951, p. 233.
- BRILLIE (H.), La marine de commerce de 1880 à 1930, *Génie Civil 1880-1930* (numéro spécial du cinquantenaire), p. 55.
- BRYANT (L.), The role of thermodynamics in the evolution of heat engines », *Technology and Culture*, 14, 1973, n° 2, 1<sup>re</sup> partie, p. 162.
- CARDWELL (D. S. L.), *From Watt to Clausius. The rise of thermodynamics in the early industrial age*. Londres, 1971. — Compte rendu : J. PAYEN, *British Journal of History of Science*, 1974, pp. 171-175.
- , HILLS (T. L.), Thermodynamics and practical engineering in the nineteenth century, dans : *History of Technology* (recueil annuel édité par A. Rupert, Hall et Norman Smith), I, Londres, 1976, pp. 1-20.
- CHAPELON (A.), *La locomotive à vapeur*, Paris, 1938.
- DAUMAS (M.), Les mécaniciens autodidactes français et l'acquisition des techniques britanniques, *L'acquisition des techniques par les pays non initiateurs* (Colloque international CNRS n° 538, Pont-à-Mousson, 1970), Paris, 1973, pp. 301-334.
- DEMOULIN (M.), *Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines. Résumé des connaissances actuellement acquises sur les machines à vapeur*, Paris, 1895.
- DICKINSON (H.-W.), *A short history of the steam-engine*, Cambridge, 1939.
- Evolution des grandes centrales thermiques, *Sciences et Industrie*, n° hors-série (42 bis), Paris, 1938.
- FRANÇOIS (Ch.), Cinquante années de construction navale militaire, *Génie Civil 1880-1930*, p. 45.
- HART (G.), Note sur le développement de l'application des turbines à vapeur à la propulsion des navires, *Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France*, 1904-1, pp. 56-117.
- Les turbines à vapeur, *Ibid.*, pp. 750-785.
- ISHIGAI (S.), Intrinsic law of development of boiler. XIVth. International congress of the history of science, Tokyo-Kyoto, 1974. *Abstracts of Papers*, p. 25 (Science Council of Japan, 1974).
- KASTLER (A.), L'œuvre scientifique de Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890). *Revue des sciences*, 65, 1958, pp. 277-297.
- LE MASSON (H.), La Marine, dans *La locomotion moderne*, Paris, 1951, p. 7.
- LORAIN (P.), Les chaudières à vapeur, *Cinquante ans de perfectionnement technique*, Paris, 1952, p. 40.
- MALLET (A.), Evolution pratique de la machine à vapeur, *Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France*, 1908-2, pp. 235-382, 387-538 ; 1910-2, pp. 127-223, 227-329.
- MONTEIL (C.), L'évolution des machines thermiques de 1880 à 1930, *Génie Civil 1880-1930*, p. 175.
- PAYEN (J.), La technologie des machines à vapeur en France de 1800 à 1850, *L'acquisition des techniques par les pays non initiateurs*, Paris, 1973, pp. 377-406.
- POWLES (H.-H.-P.), *Steam boilers. Their history and development*, Londres, 1905.
- REDONDI (P.), Sadi Carnot et la recherche technologique en France de 1825 à 1850. Présentation d'un travail de recherche. *Revue d'histoire des sciences*, XXIX, n° 3, juillet 1976, pp. 243-259.
- SABOURET (V.), Les chemins de fer depuis cinquante ans, *Génie Civil, 1880-1930*, p. 63.
- SAUVAGE (E.), *La machine locomotive*. Manuel pratique donnant la description des organes et du

fonctionnement de la locomotive, à l'usage des mécaniciens et des chauffeurs, 4<sup>e</sup> édition Paris, 1904.

— *Production, condensation de la vapeur*, Paris, 1923.

SEDILLE (M.), *Progrès de la construction des turbines à vapeur depuis dix ans*, Bruxelles, 1903 (extrait du *Bulletin de la Société belge des électriciens*, 72, 1956, n° 2).

SPRATT (H.-Ph.), The marine steam engine, dans SINGER, *History of technology*, V, 1958, p. 14.

STOWERS (A.), The stationary steam engine, *Ibid.*, p. 124.

THROP (A.), Some notes on the history of the uniflow engine, *Transactions of the Newcomen society*, XLIII, 1970-71, pp. 19-39.

WATKINS (G.), Steam-power, an illustrated guide, *Industrial archaeology*, IV-2, 1967, pp. 81-111.

WITZ (A.), *La machine à vapeur*, 3<sup>e</sup> éd. revue et augmentée, Paris, 1913.

صلهای ۲ و ۳

ARMENGAUD, REY (J.), HART (G.), LETOMBE (L.), BOCHET (A.), SEKUTOWICZ (L.), STODOLA (A.), DECHAMP (J.), Discussions sur les turbines à gaz, *Bulletin de la société des Ingénieurs civils*, 1900, pp. 754-820.

BRAUN (W. von), ORDWAY (F. I.), *L'Histoire mondiale de l'aéronautique*, Paris, 1968.

BUCHI (Alfred J.), *Exhaust turbocharging of internal combustion engines. Its origin, evolution present state of development and future potentialities*, Philadelphie, 1953.

CHALKLEY (A. P.), *Les moteurs diesel type fixe et type marine*, Paris, 1919.

*Chronik der Mercedes-Benz Fahrzeuge und Motoren*, Stuttgart 1956.

CLERK (D.), *The gas oil engine*, Londres, 1904.

CUMINS (Lyle), *Internal Fire, the internal combustion engine 1673-1900*, Portland, Oregon, 1971.

DIESEL (E.), *Diesel : das Mensch, das Werk, das Schicksal*, Stuttgart, 1948.

—, GOLDBECK (G.), SCHILDBERGER (F.), *Vom engines zum Auto*, Stuttgart, 1957.

DAUMAS (M.), Le brevet du pyrétolophore des frères Niepce, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 1, pp. 23-31.

DESARCES (H.), *Encyclopédie pratique de mécanique et d'électricité* (3 vol.), Paris, 1965.

EVANS (A.), *The history of the oil engine from the year 1860 to the beginning of the year 1930*, Londres, 1930.

FERGUSON (E.), John Ericsson and the age of the calorific, *United States National Museum Bulletin*, Washington, Smithsonian Institution, 1961.

GILLE (P.), Beau de Rochas. Les trois mémoires de 1862 sur différentes conditions d'application de l'énergie, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 2, 1963, pp. 25-42.

GOLDBECK (G.), *Gebändigte Kraft. Die Geschichte der Erfindung des Otto-Motors*, München, 1961.

—, Nicolas-Auguste Otto, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 1, pp. 34-47.

GULDNER (H.), *Calcul et construction des moteurs à combustion*, Paris, 1905.

HERLEA (Alexandre Ion), *La création, l'évolution technique et l'importance économique des moteurs industriels à combustion interne à piston jusqu'en 1914*, 1977. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, dactylographiée, Paris, CNAM-EHESS.

History (The) of Rocket Technology. Numéro spécial de *Technology and Culture*, 1963.

HUBERT (H.), *Les moteurs thermiques autres que la machine à vapeur*, Paris, 1892.

*Machines motrices et réceptrices*, Catalogue du Musée du Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris, 1952.

MARTINOT-LAGARDE, *Les moteurs d'aviation*, Paris, 1917.

MAGOT-CUVRU (P.), De l'influence du cycle sur le rendement et la pression moyenne de quelques machines thermiques célèbres, *Journal de la Société des Ingénieurs de l'automobile*, 1948.

PAYEN (J.), *Les moteurs à combustion interne ; une invention dans les textes*, Paris, 1964.

— Le rôle d'Hugon dans les premières réalisations de moteurs à gaz, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 2, 1963, pp. 43-80.

- Beau de Rochas ; Etude bibliographique, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 2, 1963, pp. 3-24.
- RICHARD (G.), *Les moteurs à gaz*, Paris, 1885.
- *Les nouveaux moteurs à gaz et à pétrole*, Paris, 1892.
- *Les moteurs à gaz et à pétrole* (2 volumes), Paris, 1893, 1894.
- SASS (F.), *Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaues von 1860 bis 1918*, Berlin, 1962.
- SEKUTOWICZ (L.), Les turbines à gaz, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, 1906, pp. 195-299.
- SERRUYS (M.), *L'invention et l'évolution du moteur à explosion depuis un siècle, de Lenoir et Beau de Rochas à nos jours*, Paris, 1962.
- *Contribution française à l'évolution technique des moteurs alternatifs à combustion interne*, Paris, 1949.
- Siècle (Le) de l'automobile ; Centenaire du moteur à explosion de Beau de Rochas et Lenoir à nos jours*. Catalogue d'exposition, Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris, 1962.
- STODOLA (A.), *Turbines à vapeur et à gaz*, Paris, 1925.
- SORENSEN (E.), *Motor und Turbine. Werkstatt und Zusammenarbeit*, Munich, 1955 (Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte).
- THURSTON (R.), *Mechanical engineering*, Vienne, 1973.
- TRESCA (H.), Sur l'invention et l'avenir des machines à gaz combustibles, *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, Paris, 1862.
- WITZ (A.), *Les moteurs à gaz* (3 volumes), Paris, 1892, 1895, 1899.
- *Dernière évolution des moteurs à gaz*, Paris, 1910.

- Commissariat à l'Énergie atomique, *Génie atomique. Cours fondamental*, PUF, 1967.
- DUVAL (Cl.), *Les nouveaux corps simples*, Paris, PUF, coll. « Que sais-je ? », n° 1005, 1962.
- L'énergie atomique*, Techniques de l'Ingénieur, Paris (en préparation).
- GUÉRON (J.), *L'énergie nucléaire*, Paris, PUF, 1977.
- *Les matériaux nucléaires*, Paris, PUF, 1977.
- JURAIN (G.), *L'uranium*, Paris, PUF, 1964.
- LEFORT (M.), *Les radiations nucléaires*, Paris, PUF, 3<sup>e</sup> éd., 1969.
- PARREINS (G.), *Les centrales nucléaires*, Paris, PUF, 3<sup>e</sup> éd., 1974.
- Revue générale nucléaire*, Paris, depuis 1975.
- ROCCHICCIOLI-DELTCHEFF (Cl.), *Les isotopes*, Paris, PUF, 2<sup>e</sup> éd., 1971.
- Syndicat CFTD, *L'électronucléaire en France*, Paris, Seuil, 1975.
- THIRIET (L.), *L'énergie nucléaire*, Paris, Dunod-Bordas, 1976.



بخش دوم

## حرکت به سوی برق صنعتی

در مجلد سوم (صفحه ۵۴۱) دیدیم که نخستین کاربرد فنی جریان برق، یعنی تلگراف، زمانی صورت گرفت که فیزیکدانهای بزرگ نیمه نخست سده نوزدهم، دانش نوین الکترومغناطیس را تدوین می کردند. در تلگراف، به کمک مغناطیسهای برقی که در اثر اتصال با جریان ضعیف پیلها برخاسته از اختراع ولتا، ایجاد می شدند، انتقال علامتها در سالهای ۱۸۳۰ - ۱۸۴۰ ممکن شد.

تلگراف برقی، اساساً فنی همراه با ایجاد نخستین راههای آهن بود؛ خط تلگراف، نه تنها، خط آهن را «همراهی» می کرد بلکه امکانی برای انتقال چپاری و سریع اطلاعات با حرکت قطارها با بهره گیری از گسترش این وسیله نوین حمل و نقل بود و هم چون راه آهن، دستاوردی بود که از آن پس هرگز رها نشد. تلگراف برقی که از آغاز موجودیت خود برپایه محکمی از تکنیک ارتباطات و حمل و نقل گذاشته شده بود، آینده مطمئنی در پیش روی داشت.

چنین آغازی در راه اندازی برق صنعتی بی تاثیر نبود. در حقیقت، صرفاً برای رفع نیازهای مربوط به ساخت وسایل برقی، سیمهای رسانا، نصب تاسیسات، راه اندازی و نیز نگهداری آنها، تکنسینهای اولیه برق در تقریباً همه کشورهای اروپا و نیز امریکای شمالی همت گماشتند و تنها طی حدود

سی سال، دشواریها را از پیش پای برداشتند. نخستین مواد و وسایل الکتریکی، رساناها، عایقها، تیرهای حامل و مجهز به عایقها، کموتاتورها، قطع کننده های جریان برق و غیره، جهت رفع همین نیازها ساخته شدند. زمانی که دینام اختراع شد، ارسال قطعی برق صنعتی ممکن گردید و کارکنان مورد نیاز برای گوناگون ساختن و بهره گیری از این اختراع، مجهز به وسایل کار، به سرعت در همه جا سر برزدند. چنانچه فاصله زیاد پیش از یک سده را برای تبدیل ماشین بخار به موتور همه کاره در نظر آوریم، اهمیت تاریخی برق صنعتی دوره پیش از مرحله راه اندازی، بهتر درک خواهد شد. اختراعات آقای وات در داخل جهان تکنیک، که هنوز آمادگی پذیرش موتور حرارتی را نداشت، حدود سه چهارم این سده را در بر می گیرد، اما پس از این اختراعات، سی و پنج یا چهل سال باید می گذشت تا ماشین بخار به دوران بلوغ خود گام گذارد.

تقریباً سی سال پس از کشف برق القایی بود که موتورهایی که می توانستند از هر دو سوی بگردند پدید آمدند و ۱۵ سال دیگر هم باید می گذشت تا تقریباً همه پایه های این تکنیک نوین گذاشته شوند. این جریان صنعتی، به علت نیازی که احساس می شد، رشته آبکاری و روشن سازی خیابانها را، که در گذشته با وسایل ناقصی انجام می شد بی درنگ در بر گرفت. دینام هم در این محیط فنی دارای سطحی چنین بالا، گام نهاد و گذشته از اینکه اختراع آن مورد پذیرش قرار گرفت، از نظر اقتصادی در وضعی بود که بدون تأخیر به کار گرفته شد. کارهای اولیه بسیار گوناگونی که برای تکمیل آن، در طول سی سال دنبال شد شرایط لازم برای راه اندازی این ابزار و به کارگیری صنعتی آن را ایجاد کردند. پیل بوئن: نیازهای روزافزون به جریان برق، طی دهها سال بوسیله مولدهای برق رفع می شد. در مجلد سوم (صفحه ۵۴۴) دیده شد که در ربع نخست سده نوزدهم، در چه موقعیتی، پیل شیمیایی از آزمایشگاه فیزیکدانها وارد حوضه عمل تکنسین ها شد. رشته آبکاری چند سال پس از آغاز تلگراف، رواج گرفت. دو گروه دیگر کاری نیز برای ساختن مولدهای شیمیایی گوناگون فعالیت داشتند. از یک سوی، شیمیدانها و فیزیکدانها برای هرچه گسترده تر کردن شمار ترکیبات فلزی الکترودها و محلولهای نمکی الکترولیتها می کوشیدند؛ و از سوی دیگر، بعضی از آنها بهتر می دیدند که پیلهای قویتری با بروندهی منظم و کار همراه با صرفه اختراع کنند. بدین ترتیب، طی چند دهه همه امکانات بسرعت بررسی شد.

پس از پیل دانیل، دو نوع دیگر در آن زمان شهرت یافتند، که یکی پیل بوئن بود و دیگری پیل لکلانشه. هر دو نوع، رواج یافتند و انواع دیگر آنها به زاویه پژوهشهای آزمایشگاهی رانده شدند. پیل بوئن که با این اسم شهرت یافت از نخستین پیلهای شیمیایی است که آقای بوئن



ساختمان آن را تحقیق کرده و در سال ۱۸۴۱ ساخته شده است. آقای ویلیام رابرت گراو<sup>۱</sup> برای تکمیل پیل دانیل، در جهت کاستن از پلاریزاسیون - جمع شدن هیدروژن روی الکترود مسی آن بسیار کوشید. وی از اسید نیتریک برای اکسید کردن هیدروژن بهره گرفت، اما به ناگزیر به جای مس از پلاتین استفاده کرد، که به علت بهای بالای این فلز، هرگونه کاربرد آن غیراقتصادی می شد. آقای بونزن به جای پلاتین، زغال را به کار گرفت که تعویضی با یک جسم ارزان بود. در واقع می بایست زغالی با فشردگی کافی و نیز خنثی داشته باشیم که طی زمان در برابر اسید نیتریک پایدار بماند. بونزن نخست اندیشید که مخلوطی از کک و زغال چوب را در دمای بالا به عمل آورد و سرانجام لایه ای از زغال بسیار سخت را که داخل قرع دستگاه تقطیر گاز روشنائی را می پوشانید، برگزید.

بدین ترتیب، پیل نخستین بونزن، الکترود مثبتی از زغال استوانه ای شکل قرع داشت که در اسید نیتریکی که درون ظرف متخلخلی از بدل چینی وجود داشت فرو رفته بود؛ و جملگی در ظرفی شیشه ای قرار داشتند؛ الکترودی مدور از ملغمه روی که دور ظرف متخلخل حلقه زده بود در آبی که بوسیله اسید سولفوریک اسیدی شده بود غوطه می خورد.

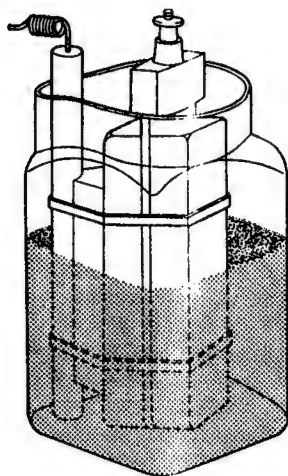
با تغییراتی که در مایع داده شد، نتایجی که با اسید نیتریک به دست آمده بود تکرار شد. بویژه خود بونزن از «حلول بیکرومات پتاسیم با موفقیت استفاده کرد. آقای پوگندورف<sup>۲</sup> نخستین کسی بود که در سال ۱۸۴۴ بیکرومات را به کار برده بود.

پیل لکلانسه: پیدایش نوع مهم دوم پیل لکلانسه، نتیجه تحقیقاتی است که برای از بین بردن پلاریزاسیون پیل - نه به کمک اسید مایع - بلکه بوسیله یک اکسید - شده بود. نخست محلولهای نافرجام گوناگونی پیشنهاد شدند، از قبیل محلول اوگوست دو لاریو<sup>۳</sup> اهل ژنو، که پروکسید سرب و پلاتین بود. اما سرانجام این آقای ژورژ لکلانسه بود که پیل پروکسید منگنز را به نام خود به ثبت رسانید. وی در سال ۱۸۶۴ فرمول آن را برای نخستین بار به دست داد. آقای لکلانسه مهندس راه آهن شرق فرانسه بود و در کار پژوهشهای شیمیایی با پیلهایی که در شبکه تلگرافی راههای آهن به کار گرفته می شدند آشنا شده بود. ساختار این پیل با نوع پیشین تفاوتی نداشت: قطب مثبت آن ورقه ای از زغال بود که مخلوطی از دو بخش برابر پروکسید منگنز و زغال خرد شده قرع اطراف آن را گرفته بود. این مجموعه فشرده در ظرف متخلخلی قرار داشت که در محلول کلریدرات آمونیم فرو رفته بود. قطب منفی آن میله ای از ملغمه روی بود. آقای لکلانسه ظرف پیل خود را به شکل مکعب

۱. W. R. Grove (۱۸۱۱ - ۱۸۹۶) فیزیکدان و قاضی انگلیسی، استاد فیزیک در لندن.

۲. Poggendorff، یوهان کریستیان (۱۷۹۶ - ۱۸۷۷)؛ فیزیکدان آلمانی.

۳. La Rive (۱۸۰۱ - ۱۸۷۳) فیزیکدان سوئیسی.



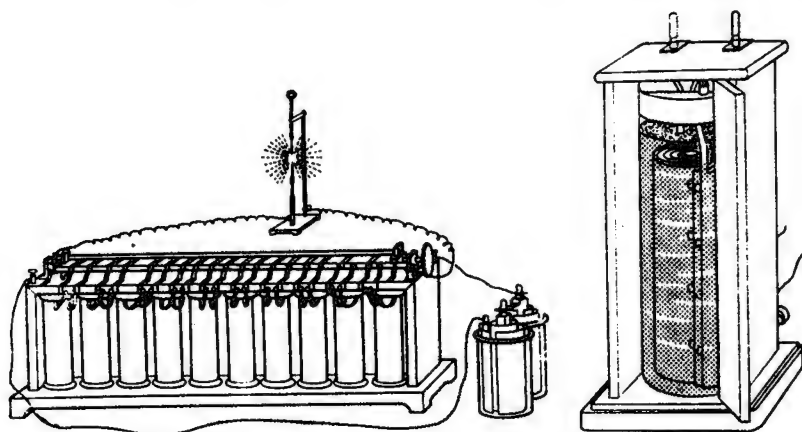
شکل ۱. پیل لکلانسه (۱۸۶۴).

میله زغالی را مخلوطی از پروکسید منگنز و خرده زغال احاطه کرده است. الکترود روی در گوشه چپ پیل قرار دارد.

مستطیلی برگزید، گویا برای اینکه از پیل بونزن که استوانه‌ای بود متفاوت باشد (شکل ۱). پیل لکلانسه را در فرانسه، چند سال بعد، وزارت تلگراف رسماً پذیرفت و آن را به تعداد زیاد با مشخصات استاندارد ساخت. در کشورهای دیگر، ساخت پیلها در مقیاس صنعتی انجام می‌شد و بتدریج که کاربرد آنها گسترش می‌یافت، همهٔ مؤسسات بزرگ که در تدارک ساختن ماشینهای برقی بودند، مدل‌های خاص خود را وارد بازار کردند که با مدل‌های مهمی که ذکر آنها رفت تفاوت اساسی نداشتند. کمی پس از زمانی که لکلانسه تولید پیل خود را آغاز کرد، پیل شیمیایی دیگری همراه با «باتری انباره‌ای» پلانته یعنی آکومولاتور ساخته شد.

باتری انباره‌ای: آقای گاستون پلانته در سال ۱۸۵۴، زمانی که دستیار آقای ادمون بکرل در کنسرواتور پیشه و هنر شد تنها ۲۰ سال داشت. در این زمان بود که وی برای کارشناسی در فیزیک و بویژه در رشتهٔ مولدهای شیمیایی برق کار را آغاز کرد.

شروع پژوهشهای وی، بررسی کارهای فیزیکدان کم شناخته شده‌ای با نام گوترو<sup>۱</sup> بود که در آغاز آن سده، نشان داده بود که اگر قطبهای یک ولتامپرسنج را که در آن تجزیهٔ آب صورت می‌گیرد به یکدیگر وصل کنند، جریان برق در مدار پدید می‌آید. این آزمایش پیش از آقای پلانته چندین بار انجام



شکل ۳. آکومولاتور پلانته.

شکل ۲. یکی از خانه‌های آکومولاتور پلانته

در سمت راست، پیل بونزن برای شارژ کردن آکومولاتور؛ در بالا، لامپ کوچک قوسی.

یک گوشه این قوطی باز شده است تا درون آن

دیده شود.

گرفته بود و بدون اینکه یک کاربرد عملی برای آن پیشنهاد کنند تفسیر شده بود. در آغاز سال ۱۸۵۹ پلانته خود را وقف بررسی «پلاریزاسیون ولتایی» کرد و چند ماه پس از آن، در مارس ۱۸۶۰، نخستین باتری انباره‌ای خود را در آکادمی فرانسه به نمایش گذاشت. این باتری که ساختمان و مشخصات آکومولاتورهای سربی را داشت سریعاً رواج یافت. در حقیقت، این آقای پلانته بود که کاربرد دو صفحه سربی را، که به طور مارپیچی یکی دور دیگری پیچیده شده و یک نوار پارچه‌ای آنها را از یکدیگر جدا ساخته بود، پیشنهاد کرد. استوانه‌ای که بدین ترتیب ساخته می‌شد در ظرفی شیشه‌ای محتوی آب اسید گذاشته می‌شد. قطبهای این باتری انباره‌ای با قطبهای یک پیل بونزن متصل می‌شد تا پلاریزاسیون صفحات سربی تحریک شود. بدین ترتیب، این پیل، شارژ و در مدار آن جریانی ایجاد می‌شد که با آن می‌توانستند مثلاً یک لامپ کوچک قوسی را، برای اثبات وجود جریان، روشن کنند (شکلهای ۲ و ۳). آقای پلانته توانست یکی از نقایص پیلها، پلاریزاسیون، را که همه کوششهای فیزیکدانان تا آن زمان در جهت برطرف ساختن آن بود، از بین ببرد. وی پس از موفقیت‌های اولیه دست به کار بررسی منظم فلزات شد و اظهار داشت که سرب باتری نیروی برقزانی بسیار بالایی تهیه می‌کند و در عین حال مقاومت داخلی این زوج بسیار کم خواهد بود. علاوه بر این، وی دریافت که چنانچه این کار با یک زوج چندین بار تکرار شود، هر دو مشخصه اصلی بهتر خواهند شد و یک جریان ثانوی قویتر از جریانی که از پیل

اولیه خارج می شود به دست می آید. این تکنیک «تشکیل» الکترودها، هنوز هم اهمیت خود را دارد. بیست سال پس از کارهای پلاتنه، فیزیکدان دیگری با نام س. فور<sup>۱</sup> برای یافتن وسیله‌ای جهت کاستن مدت «تشکیل» الکترودها، که بسیار طولانی بود، کوشید. وی در سال ۱۸۸۱ از صفحات دارای اکسیدهای بازگردانیده شده استفاده کرد. سپس با همکاری آقایان سالون<sup>۲</sup> و فولمار<sup>۳</sup> وسیله‌ای ساخت که از صفحات مشبک با آستری از سرنج ( $Pb_2O_4$ ) فشرده تشکیل می شد و چند ماده الحاقی سریبی بدان افزوده شده بود.

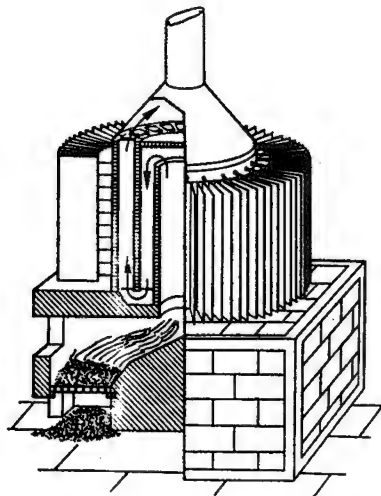
آقای پلاتنه، پس از چند سال به پژوهشهای خود دربارهٔ آکومولاتورهایش پایان داد و بهترین شکل آن را بررسی کرد و در امکان ردیف کردن آنها به شکل باتری، چگونگی شارژ و به کارگیری آنها تعمق کرد. آکومولاتورها با وجود سنگینی وزن بزودی یک منبع الکتریسیته قابل حمل را تشکیل دادند. این وسیله بی درنگ نام آکومولاتور (انباره) یافت زیرا چنین می نمود که الکتریسیته را انبار می کند تا هرگاه بدان نیاز افتد در اختیار گذارد. آن را بدیدهٔ ترانسفورماتور برقی هم نگریسته اند. کارهای پلاتنه چنان کامل بود که به هنگام نمایشگاه سال ۱۹۰۰ اظهار نظر شد که علی رغم کاربردهای گوناگون این مولد که از آن پس می توانست با یک دینام از نو شارژ شود هیچ کمبودی در آن دیده نمی شود. پژوهشهای نابه هنگام پیل گازی و ترمو- الکتریسیته: تعیین زمان آغاز نابه هنگام برخی رشته‌های پژوهشی که کاربرد فنی آنها حدود یک سده بعد ایجاد شد جالب است: از یکسوی، پیل گازی است که آقای ویلیام رابرت گروو فیزیکدان انگلیسی ترکیب شیمیایی و آثار آن را در سالهای ۱۸۴۱ - ۱۸۴۶ بررسی کرد. این وسیله نوعی باتری ولتامپرسنجی است که با اتصال زنجیری و لوله‌های باریک آن دارای هیدروژن و اکسیژن بود. آقای گروو ترکیب هیدروژن و کلر را هم بررسی کرد. پیل گازی آقای گروو با اینکه در همهٔ کتابهای مرجع فیزیک درج شده بود تنها، در دههٔ ۱۹۵۰ به شکل پیل سوختی ساخته شد. اثر گرما برق (ترمو الکتریک) نیز از دیر باز شناخته شده است. در سال ۱۸۲۱ آقای توماس زبک<sup>۴</sup>

تولید جریان برق را با گرم کردن محل جوش دو صفحه بیسموت و مس بررسی می کرد. فیزیکدانهای متعددی در سالهای بعد این بررسی را ادامه دادند و شماری از آنها مانند بوئن، ادمون بکرل نیز پیلهای ترموالکتریک ساختند، آنان برای این کار چندین زوج فلزی در دسترس را برای گرم کردن یک ردیف جوشکاری متصل ساختند، در حالی که ردیف دیگر را از گرما دیدن مجزا کرده بودند. آزمایشهای بسیار پیشرفته را آقای فرانسوا کلامون<sup>۵</sup> انجام داد که در جریان دههٔ ۱۸۷۰ نمونه‌های گوناگونی از پیلها طرح

1. C. Faure 2. Sallon 3. Vollmar

۴. Seebeck، توماس یوهان (۱۷۷۰ - ۱۸۳۱)؛ فیزیکدان آلمانی.

5. F. Clamond



شکل ۴. پیل کلامون، از نوع ترموالکتریک (۱۸۷۰).

کرد که آخرین آنها در کتابهای مرجعی فیزیک شرح داده شده است اما در بعضی از کارگاهها تک‌وتوک به‌کار گرفته شده بود. این پیلها از مفتولهای آهنی و میله‌هایی از آلیاژها روی - آنتیموان ساخته شده بودند. این پیلها آرایش ستاره‌ای داشتند که در مرکز این ستاره کانون گرما قرار داشت. گرم کردن پیل بوسیله یک چراغ بونزن گازی انجام می‌گرفت یا در مدل‌های بزرگ، اجاقی از زغال گذاشته می‌شد (شکل ۴). بخوبی دیده می‌شود که از پیل آقای کلامون با وجود طرح هوشمندانه آن هیچ صنعتگری استقبال نکرد. بهای تمام شده جریان برقی که بدین ترتیب به‌دست می‌آید بسیار بالا بود. وانگهی پیدایش دینامها راه را بر پیشرفت اقتصادی این اختراع سد کرد. نخستین کاربرد صنعتی زوجهای (گرما برقی) را آقای هانری لوشاتلیه در سالهای ۱۸۸۰ برای ساختن تقسجهایی (پیرومترهایی) به‌کار گرفت که دمای کوره‌ها را اندازه می‌گیرند.

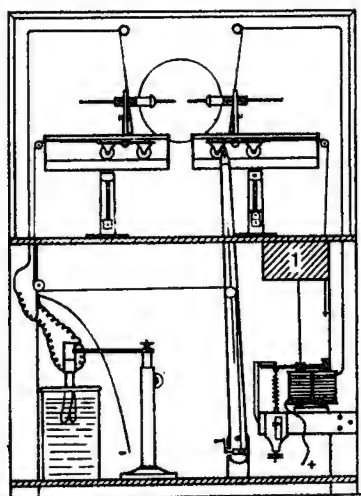
بی‌شبهه، پیش از پیدایش ماشینهای بزرگ مغناطیسی برقی و حتی در تمام مدت نوآوری دینامها، پیلها و آکومولاتورها تنها منابع موجود جریان برق و جریان مستقیم آن بودند. در جنب تلگراف و تقریباً همزمان با آن کاربردهای دیگری برای برق پدید آمدند. با ساختن باتریهایی از پیل‌های بزرگ، به کاربرد صنعتی گالوانوبلاستی (صفحه ۷۳۷ را ببینید) دست یافتند و با کمک قوسهای برقی برای روشن‌سازی خیابانها، آزمایشهای اساسی انجام شد. توجه داده

می‌شود که بویژه این دو زمینه کاربرد هستند که نخستین میدانهای استفاده از مولدهای گردان را پدید آوردند. همزمانی این دو زمینه را نباید تصادفی دانست.

قوس الکتریکی: آزمایشهای نخستین قوس الکتریکی با یک پیل ساده ولتا در سال ۱۸۰۰ بوسیله هامفری دیوی انجام گرفت. کمی بعد زمانی که این فیزیکدان انگلیسی در سال ۱۸۰۸ با سرمایه شخصی خود، پیل بزرگ ۲۰۰۰ واحدی رویال اینستیتیوشن<sup>۱</sup> را ساخت کارهای خود را به زمینه الکترو شیمی و قوس الکتریکی بسط داد. او به سال ۱۸۱۰ نخستین «تخم مرغ برقی» را به نمایش گذاشت، که حبابی به شکل تخم مرغ بود که برای پرهیز از سوختن سریع زغالها در آن، هوای آن را بیرون کشیده بودند، بدین ترتیب قوس الکتریکی چند لحظه‌ای دوام داشت.

نخستین کارهای روشن سازی با قوس الکتریکی پس از گذشت سی سال از این تاریخ بود. پایه گذار این کار لامپی آقای لئون فوکو بود که در آن زمان بیش از ۲۵ سال نداشت. وی لامپی قوسی طرح کرد که می‌توانست برای یک پروژکتور خورشیدی نقش منبع نوری را ایفا کند. آقای فوکو از این پروژکتور برای انعکاس شکلهای یک کتاب کالبدشناسی استفاده می‌کرد. این الکترودها، دیگر میله‌های زغال چوب نبودند بلکه مفتولهایی تراشیده شده از زغال قرع تقطیر زغال سنگ بودند که بوزن از چندی پیش از آن برای ساختن الکترودهای پیل خود استفاده می‌کرد. از آنجا که فرسایش این زغال به طور چشمگیری کم شده بود، نیازی به خلأ سازی محیط آن احساس نمی‌شد. فوکو تنها به ساختن وسیله‌ای بسنده کرد که بتدریج که الکترودها مستهلک می‌شدند آنها را با دست به یکدیگر نزدیک می‌ساخت. با همین وسیله بود که در سال ۱۸۴۴، آقای دلویل<sup>۲</sup> که ابزار فیزیکی می‌ساخت، نخستین آزمایش برای روشن سازی شهر را در میدان کنکورد پاریس انجام داد. وسیله وی نوعی لامپ قوسی مجهز به یک نورافکن بود که روی مجسمه‌ای در شهر لیل نصب شده بود.

چندی نگذشت که آزمایشگران متعددی برای خودکار شدن تنظیم میله‌های زغالی کوشیدند. نخستین اختراع برای این تنظیم را آقای تامس رایست انگلیسی به سال ۱۸۴۵ انجام داد و دیگران بسرعت اختراعات دیگری را به ثبت رسانیدند. بین سالهای ۱۸۴۶ - ۱۸۵۲ مخترعی که زیاد شناخته شده نبود با نام و. ی. استیت<sup>۳</sup> چندین ابزار برای این کار طرح کرد، که در آنها یک سیملوله (سولنویید) با اتصال زنجیری با مدار زغالها مربوط می‌شد. میله‌ای که در این سیملوله بالا و پایین می‌رفت، متناسب با شدت جریان برق، شل و سفت می‌شد. کلاچ، مکانیسمی را فعال می‌ساخت که بوسیله نوعی حرکت ساعتی کشیده می‌شد تا جهت حرکت را معکوس سازد و میله‌های زغال را به طور خودکار از یکدیگر دور یا به هم نزدیک سازد. آقای استیت رفته رفته



شکل ۵. لامپ قوسی با ناظم فوکو.

هر دو میله زغالی قوس با سیستم بسیار پیچیده‌ای از طنابها، دور و نزدیک می‌شدند. سیستم طنابها به اهرم بزرگ عمودی فرمان می‌دادند و این اهرم بر روروک زغال سمت راست تکیه داشت. چرخنده ساعتی (۱) را جوش مغناطیس برقی سمت راست، به تواتر بازو بسته می‌کرد. در سمت چپ، یک ظرف پر از سولفات محلول دیده می‌شود تا با فرو رفتن سنجیده انبرک پلاتینی در آن، جریان برق پیل آرام شود.

دستگاههای خود را ساده‌تر کرد اما گویا ابتکارهای وی رواج زیادی نیافتند.

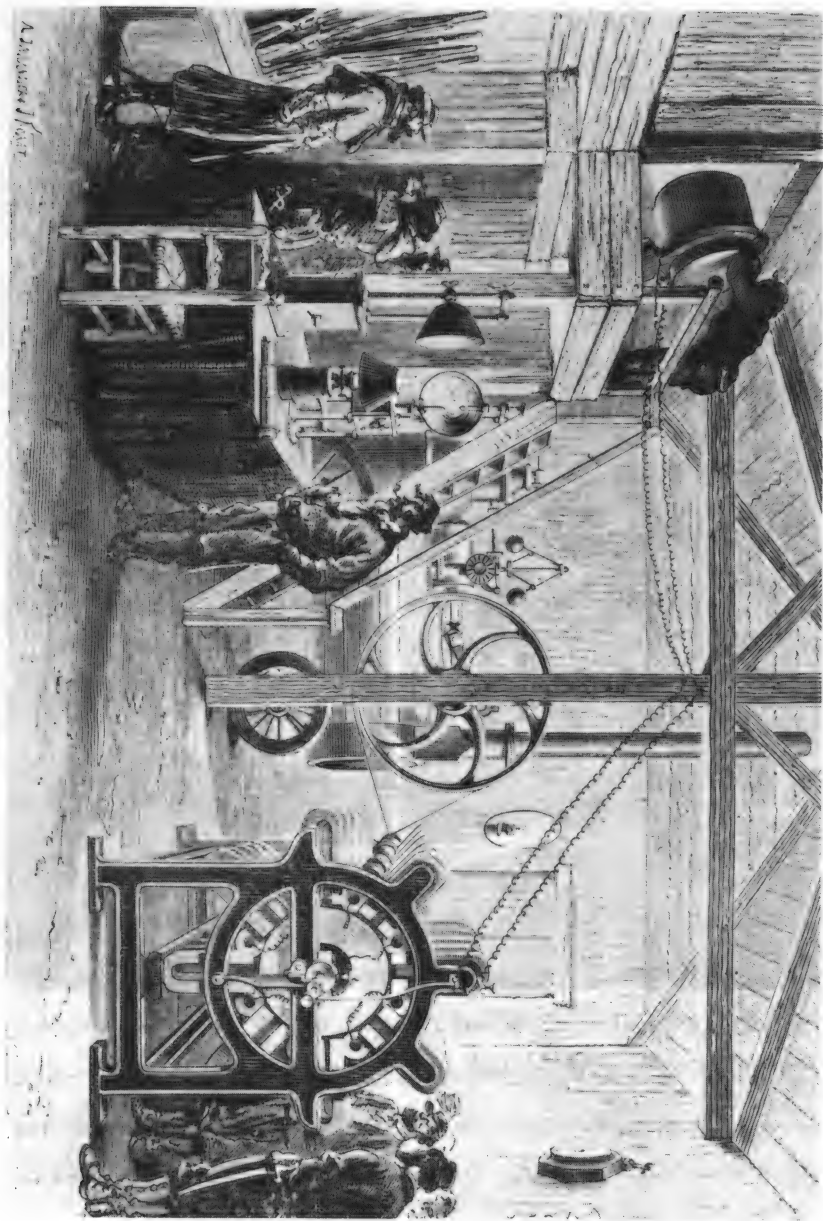
در فرانسه در همین زمان آقای آرشرو<sup>۱</sup> از یک (سیملوله) سولنویید برای تنظیم فاصله میله‌های زغال استفاده می‌کرد. فوکو نیز بنوبه خود دستگاههای نسبتاً پیچیده‌ای را پیشنهاد کرد (شکل ۵) که در سال ۱۸۴۹ به همت آقای ژ. دوبوسک<sup>۲</sup>، فیزیکدان و ابزارساز، به ناظمی تبدیل شد که با استفاده از آن در میزانشن اپرای پاریس موفقیت درخشانی به‌دست آورد.

آقای سرن<sup>۳</sup> پس از کارهای تعدادی از مخترعان دیگر، در سال ۱۸۵۷ راه‌حل خوبی برای این مسأله پیشنهاد کرد. ناظم آقای سرن، که در سالهای بعد پیاپی تکمیل شد، بر همان اصول پیشینیان وی پایه‌گذاری شده بود: چرخنده ساعتی که وزنه‌ای آن را می‌گردانید تا جابه‌جا شدن زغالها و مغناطیس برقی را، به‌عنوان وسیله ناظم ممکن سازد (شکل ۶). در همین زمان نخستین ماشینهای مغناطیسی برقی، که در آینده از آنها سخن خواهیم گفت، به‌کار گرفته شده بودند و روشن‌سازی شهر با لامپهای قوسی، بویژه در کارگاهها، برای نوبت کار شب، بتازگی به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گرفتند.

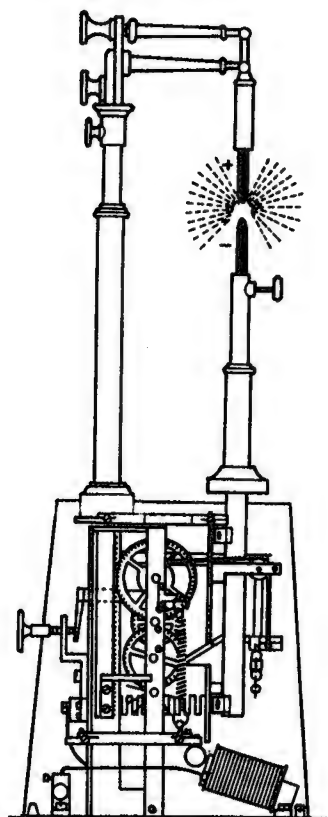


تابلوی ۱۵. روشن‌سازی میدان کاروزل با برق (۱۸۸۲).





تابوی ۱۶. نوازکن برقی، به هنگام محاصره پاریس (۱۸۷۰).



شکل ۶. لامپ قوسی با ناظم سرن (۱۸۵۶-۱۸۵۷).

خود ناظم یک چرخدنده ساعتی است که در پایه دستگاه جاسازی شده است. وزن بازوی حامل زغال بالایی آن را می‌گرداند. مغناطیس برقی اهرم پایینی را متناوباً جذب می‌کند تا بازویی را که حامل زغال پایین است بالا ببرد.

نخستین کاربردهای این لامپها به کمک پیل‌های بونزن در موزه لوور و پل نتردام و در کارگاه باراندازهای ناپلئون و در پایان نمایشگاه سال ۱۸۵۵ در مراسم تزیین پاله دو لندوستری<sup>۱</sup> برای توزیع پاداشها بوده است.

در سال ۱۸۵۹، وسیله سرن که از یک ماشین مغناطیسی الکتریکی آلیانس<sup>۲</sup> تغذیه می‌شد برای روشن‌سازی فانوس دریایی مورد آزمایش قرار گرفت. در سال ۱۸۶۵ پس از چند سال آزمایش

1. Palais de l'industrie 2. Alliance

هر دو فانوس دماغه او<sup>۱</sup> برای همیشه با ناظم سرن مجهز شدند در سال ۱۸۶۲ فانوسهای دریایی انگلستان نیز با لامپهای قوسی که یک ماشین هولمز آنها را تغذیه می کرد روشن شدند. اما تا سال ۱۸۸۰ این روش روشن سازی فانوسها با کندی بسیار رواج می یافت. در این تاریخ بر روی هم ۱۱ فانوس با قوس برقی روشن بودند؛ اما از این پس این روش بسرعت متداول شد.

در مورد روشن سازی خیابانها باید گفت که آغاز مبهمی دارد. در سالهای ۶۰ تنها به طور پراکنده از این روش استفاده شده بود و روشن سازی خانه ها، باغها یا محلهای پذیرایی رسمی و تشریفاتی با لامپهای برقی بود.

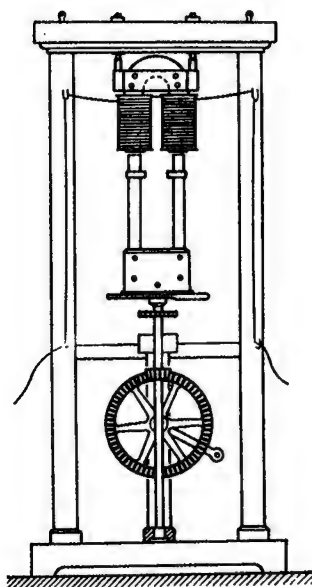
روشن سازی با گاز در این زمان رواج کلی داشت زیرا با این شکل و با این نوع مولد، روشن سازی با برق نمی توانست برای ارائه سرویسی منظم با گاز رقابت کند. در واقع مولدی برای لامپ قوسی لازم بود و مولدها تنها به توسط ماشینهای بخار کار می کردند. حتی با پیوست این دستگاههای بخار روی چندین مولد، بهای تمام شده برق برای اینکه بتوان تأسیسات دائم داشت بسیار زیاد است و فضای زیادی که اشغال می شد مانع استفاده خصوصی از این تأسیسات بود.

تنها سخنی که می ماند این است شدت نور برق مردم آن زمان را تحت تأثیر قرار داد و چند دستگاهی که طی بیست سال ساخته شدند راه پیشرفت سریع این روش روشن سازی را به محض در اختیار داشتن دینام، هموار ساختند.

مولدهای مغناطیسی برقی آزمایشگاهی: ماشینهای بزرگ مغناطیسی برقی، در واقع برای تغذیه لامپهای قوسی ساخته شدند. پیش از ساخت آنها یک رشته تمام از ماشینهای کوچک دستی بمحض آشنایی با پدیده القا، در سالهای ۱۸۳۰ - ۱۸۳۱ به برکت کارهای فاراده ساخته شده بودند. فاراده به سال ۱۸۳۱ قوانین القای الکترو مغناطیسی را تنظیم کرد. این قوانین، شمار زیادی از آزمایشگران و سازندگان را برای ساخت مولدهای جریان با آهنرباهای دائمی به عنوان القاگر و سیم پیچهای دارای هسته به عنوان القاگیر ترغیب کرد.

نخستین کس از این عده آقای ایپولیت پیکسی، سازنده ابزارهای فیزیکی در پاریس بود. فاراده مشاهده کرده بود که چنانچه دو پیچک متمایز از سیمی هادی روی حلقه ای از آهن نرم گذاشته شوند، اگر جریان پیل در یک پیچک قطع یا برقرار شود جریانهای ناپایداری در پیچک دیگر ایجاد می شود. بعدها وی در جریان یک آزمایش خود متوجه پدیده القا شد. وی اظهار داشت که اگر آهنربایی را در امتداد محور یک سولنویید (سیملوله) حرکت دهند جریانی در سولنویید ایجاد می شود جهت این جریان برحسب اینکه آهنربا به سولنویید نزدیک یا از آن دور شود تغییر می کند.

۱. Héve: دماغه ای در سن-ماریتیم که در شمال مصب رودخانه سن است.

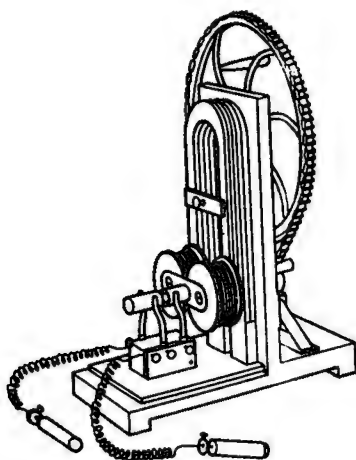


شکل ۷. دستگاه الکترومغناطیسی پیکسی (۱۸۳۳).

در بالا، مغناطیسهای برقی ثابت که بالای دو میله هستند با قاعده خود تشکیل آهنربایی را می‌دهند که حول یک محور عمودی می‌گردند.

آقای پیکسی با راهنمایی امپراتور ماسینی ساخت که دارای دو سولنویید (سیملوله) بود که میله‌هایی از آهن نرم، که شبکه‌ای آهنی آنها را به یکدیگر متصل می‌کرد، از میان آنها می‌گذشت. در زیر این وسیله یک آهنربای نعل اسبی طوری گذاشته می‌شد که هر کدام از قطبهای آن در برابر دو شاخ میله‌های آهن نرم قرار بگیرند. سیستمی از چرخنده امکان می‌داد که آن آهنربا حول محور عمودی خود بگردد. بدین ترتیب، حرکت آهنربا نسبت به سیملوله‌ها، که مقرر جریانهای متناوب بودند ممکن می‌شد (شکل ۷).

در آن زمان فکر نمی‌کرد که یک جریان متناوب بتواند به‌کار گرفته شود زیرا تنها منبع جریانی که آنها می‌شناختند پیل شیمیایی بود. پیکسی بر اثر اشارات امپراتور کموتوری طرح کرد که قطبهای ماشین را به تناوب با سیم هادی مدار بیرونی متصل می‌ساخت. بنابراین، از همان آغاز، ساخت سه قطعه اصلی ماشینهای گردان شناخته شدند: القاگر، القاگیر، کموتاتور.



شکل ۸. دستگاه الکترو مغناطیسی کلارک.

مدتی بیش از سی سال، ماشینهای گوناگونی که ساخته شدند، شکل و آرایش هرکدام، با دیگری تفاوت زیاد داشت، اما جالب است که الفاکر همیشه از یک یا چند آهنربای دائم بود. نخستین نوع متفاوت در سال ۱۸۳۳ به توسط یک انگلیسی غیر حرفه‌ای با نام ویلیام ریچتی ساخته شد. وی اندیشیده بود که آهنربای نعل اسبی را در پایین ماشین قرار دهد و قطبها به‌سوی بالا هدایت شوند. قرقره‌ها در بالا میان دو دیسک موازی بسته می‌شدند و حول محور افقی خود می‌گردیدند. قرقره‌ها متوالیاً از میان قطبهای آهنربا می‌گذشتند.

در همان سال یک سازنده آمریکایی ابزار با نام جوزف سکستون نوع دیگری از ماشین با الفاکر گردان طرح کرد. دو جفت قرقره در برابر قطبهای آهنربایی که به‌طور افقی گذاشته شده بود می‌گردیدند. این قرقره‌ها توسط بازویی که حرکت آن را یک تسمه و فلکه به یک محور گردش افقی انتقال می‌داد، جابه‌جا می‌شدند.

کمی بعد در سال ۱۸۵۵ یک انگلیسی با نام ادوارد کلارک ابزار سکستون را بدین ترتیب تغییر داد که آهنربایی را که روی صفحه‌ای بسته شده بود عمودی قرار داد و یک جفت قرقره را در برابر قطبهای آن می‌گردانید. قرقره‌ها روی محور افقی قرار داشتند و روی این محور کموتاتوری که با کموتاتور آمپر-پیکسی تفاوت بسیار داشت گذاشته شده بود (شکل ۸). دستگاه آقای کلارک مدت زیادی به‌عنوان یک دستگاه نمایشی آزمایشگاه‌ها، شهرت فراوان داشت.

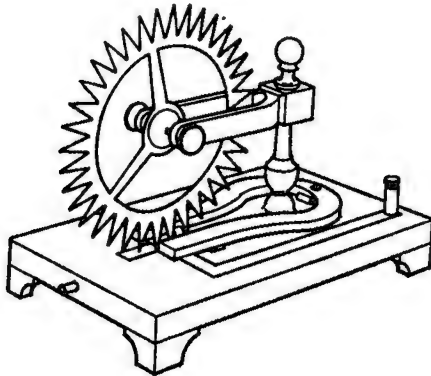
القاگیر متحرک کلارک الگویی برای دستگاههای گوناگون به اصطلاح «دیسکی» شد. در این دستگاهها سیستمی از قرقره‌ها میان دو صفحهٔ مجهز به آهنرباهای دائم یا برقی می‌گردید. فیزیکدانهای متعددی برای بهتر کردن جزئیات آن کوشیدند که یکی از آنها به نام پولفرماخر<sup>۱</sup> گویا نخستین کسی بود که به سال ۱۸۴۹ به جای هسته‌های قرقره از مجموعهٔ ورقهای آهنی استفاده کرد.

آقای چارلز ویتستون در سال ۱۸۴۱ ماشینی ساخت که تنها می‌توان آن را کپی ماشین کلارک دانست. این ماشین پنج القاگیر با فرجهٔ ۳۶ درجه داشت که روی دیسکی ثابت شده بودند و بین قطبهای شش آهنربای دائم می‌گردیدند. کولکتور (گردآور)ها به‌طور زنجیری اتصال داشتند و این امر سبب می‌شد که در هر لحظه نیروی برقانی کل برابر با جمع پنج نیرویی باشد که ماکزیم آنها در فرجهٔ ۳۶ درجه است. این ترتیب نزدیک شدن به جریان مستقیم را ممکن می‌ساخت. آقای ویتستون بدین ترتیب دامنهٔ موج‌سازی را کاهش می‌داد و اهمیت فاز را که از آن پس نیز مدتی نزدیک به نیم سده به‌کار گرفته نشد، روشن ساخت.

ویتستون همچنین حدود سال ۱۸۴۵ به جای آهنرباهای دائم از مغناطیسهای برقی. تحریک شده بوسیله جریان یک ردیف پیل استفاده کرد. اما این نوآوری نیز تا ۲۰ سال بعد به‌کار گرفته نشد. در همان اوان فیزیکدانی امریکایی با نام چارلز پیچ<sup>۲</sup> در سالهای ۱۸۳۵ - ۱۸۴۰ کوشید تا از آرایش تازه‌ای استفاده کند اما اندیشهٔ وی دنبال نشد. یکی از طرحهایی که در بعضی از ماشینهایش به‌کار گرفت ثابت نگاهداشتن آهنربا و قرقره‌ها اما تغییر دادن شدت میدان مغناطیسی با حرکت خطی میلهٔ آهن نرم بود که به‌عنوان هستهٔ قرقره‌ها عمل می‌کرد. در آرایش دیگری آهنربا به‌طور افقی ثابت نگاهداشته شده بود و شاخهای آن از درون قرقره‌ها رد می‌شدند. آرماتوری از آهن نرم را بازو و چرخنده‌ای در برابر قطبهای آهنربا می‌گردانیدند.

این نوع مولد با «آهن گردان» پس از گذشت سالهای زیاد، بدون اینکه چیزی از آقای پیچ اقتباس کرده باشد در طرح بعضی از مولدهای جریان متناوب، بویژه مولدهای دارای بسامد زیاد، احیا شد.

کوششهای نابه‌هنگام در موتورهای برقی: هرچند که اصل برگشت‌پذیری وظایف یک ماشین مغناطیسی برقی شناخته شده بود، باز جالب است بدانیم که مخترعان مولدها در پی این نبودند که این وسیله بتواند با تغذیه از جریان یک پیل، همچون موتوری کار کند. گویا تنها آقای چارلز پیچ بدین هدف خیلی نزدیک شده بود، اما انواع موتورهای وی تفاوت زیادی با انواع مولدهای او داشتند.



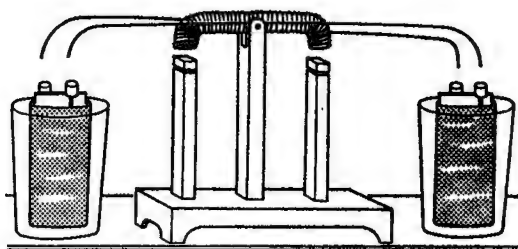
شکل ۹. چرخ بارلو.

نوکهای این چرخ؛ با سطح فنجانی جیوه دار که بین قطبهای یک مغناطیس گذاشته شده است، تماس می یابند. جیوه و محور چرخ اتصال الکتریکی را برقرار می سازند.

از زمان آزمایش آقای پتر بارلو در سال ۱۸۲۲ روی گردش یک سیم هادی در میدان مغناطیسی - آزمایشی که پیش از آزمایشهای فاراده انجام گرفته بود - نخستین روتور برقی را موتور بارلو می دانند. قطعه متحرک این موتور، دیسک دندانه دار ساده ای است که نقش سیم هادی را دارد نه یک آهنربای برقی. این چرخ، محل گشتاور پیچشی (کوپل) است که همواره در یک جهت عمل می کند (شکل ۹). بیش از نیم سده باید بگذرد تا موتورهای برقی صنعتی با جریان مستقیم، بوسیله رساناهایی که جریان برق را انتقال می دهند و در میدانهای مغناطیسی می گردند، ساخته شوند.

اما سازندگان نخستین موتورهای برقی از نمونه بارلو تقلید نکردند. آنها در پی بهره گیری از نیروهای نسبتاً مهمی برآمدند که بوسیله مغناطیسهای برقی جرمهای مغناطیسی را جذب کند یا بین آنها نیروی جاذبه و دافعه ایجاد نماید. اما، علاوه بر اینها، بیشتر مخترعان نتوانستند از تصویر ماشین بخار و حرکت متناوب آن، که کلاسیک شده بود آزاد شوند. آنها از بهره گیری از آثار گردش پیوسته چشم پوشانند و تنها در پی تعویض پیستونها با مغناطیسهای برقی برآمدند، درحالی که سیستم سنگین بازولنگ را نگاهداشتند.

باید گفت که همان نخستین موتور جوزف هنری در سال ۱۸۳۱ می توانست پیش نمونه یک موتور برقمغناطیسی تلقی شود که یک قرقره طویل مغناطیس برقی داشت که حرکتی نوسانی روی



شکل ۱۰. موتور هنری (۱۸۳۱).

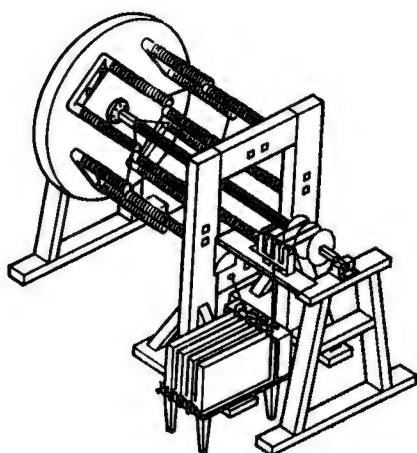
نوسانه‌ای عمودی متناوباً با پیل‌هایی که در دو سوی دستگاه گذاشته شده‌اند، اتصال برقی را برقرار کنند.

قطب‌های یک آهنربای دائم انجام می‌داد (شکل ۱۰). کوشش‌های دیگری در سال‌های بعد در ایتالیا، انگلستان و آمریکا دیده شد. گویا این ریتچی انگلیسی بود که به عنوان نخستین کس در سال ۱۸۳۳ توانست حرکت دورانی مغناطیسی افقی را، که قرقره‌هایی از یک رسانا آن را دربرگرفته بودند، ایجاد کند. مخترعان دیگری از زمره ویلیام استورجن<sup>۱</sup> در ۱۸۳۳، ت. ادموندسن<sup>۲</sup> در ۱۸۳۴، فرنیس واتکینز<sup>۳</sup> در ۱۸۳۵ توانستند مجموعه میله‌های مغناطیسی شده را که به‌طور ضربدری یا ستاره‌ای آرایش یافته بودند در برابر قطب‌های مغناطیسه‌ای برقی به گردش درآورند. همه این وسایل می‌توانستند از طریق یک فلکه، حداکثر بارهای سبکی را بلند کنند.

آزمایشی که در این زمان سرنوشت‌ساز شد به آقای هرمان فون یاکوبی در سال ۱۸۳۸ در سن پترزبورگ مربوط می‌شد. وی موتور برقی اختراعی خود را بر روی قایقی که دوازده نفر سرنشین داشت، نصب کرد. در سال ۱۸۳۴ نیز آقای یاکوبی موتوری را ساخت و آزمایش کرد که القاگر و القاگیر آن مغناطیسه‌ای برقی نعل اسبی بودند. یک باتری چهار خانه‌ای را به‌طور افقی روی تکیه‌گاهی عمودی چنان نصب کرده بود که هشت قطب این خانه‌ها، تاجی را تشکیل می‌دادند و تاج مشابهی که بر روی دیسک متحرکی حول محور افقی می‌گردید رو در روی آن قرار داشت (شکل ۱۱). کوموتاتوری با چهار چرخنده، جریان پیلی را که تحریک‌کننده مغناطیسه‌ای برقی متحرک بود، در زمانی که این مغناطیسه‌ها رودرروی مغناطیسه‌های ثابت قرار می‌گرفتند، معکوس می‌ساخت. بدین ترتیب، یک نیروی دافعه تشکیل می‌شد که نیروی جاذبه‌ای بر اثر کوپل بعدی نیروها به دنبال داشت؛ در نتیجه، محور موتور می‌گردید.

یاکوبی با موتوری از همین نوع، اما کاملتر- در پرتو کمک مالی تزار- توانست قایق خود را





شکل ۱۱. نمایه موتور برقی یاکوبی (۱۸۳۴).

بخش متحرک این موتور، دیسک سمت چپ تصویر است که حامل چهار مغناطیس برقی است.

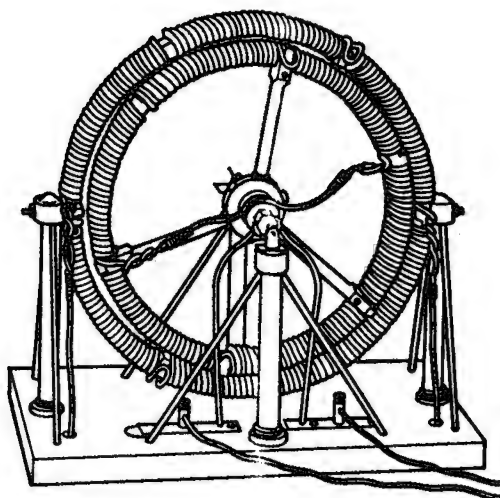
مدت سه ساعت روی رودخانه نوا حرکت دهد. منبع برق آن یک باتری دارای ۱۲۰ پیل گروو بود. سرعت متوسط این قایق ۳/۶ کیلومتر در ساعت بود.

یاکوبی با اندازه‌گیری شدت جریانی که از پیلها گرفته می‌شد اظهار داشت که در سرعت حداکثر، این شدت به نصف مقدار لحظه شروع حرکت کاهش می‌یابد. اشکال کار از اثر نیروی برق و ارانی بود که از جابه‌جایی قرقره‌ها در میدان مغناطیسه‌های برقی ثابت، ایجاد می‌شد. این موتور برگشت‌پذیر بود اما یاکوبی توضیح روشنی برای آن نداده بود. برای اینکه این پدیده بخوبی شناخته شود باید چشم به راه کارهای آنتونیو پاجینوتی<sup>۱</sup> (که آن هم گویا نادیده گرفته شده‌است) و بررسیهای ایپولیت فونتین روی دینام گرام به سال ۱۸۷۲ بود.

آزمایشهای یاکوبی برای تأسیس ناوگان کوچکی با موتورهای بوسیله برقی روی رودخانه نوا، پس از این نمایش دنبال نشد زیرا بهای تمام شده جریانی که بوسیله پیل ایجاد می‌شد دربرابری که از این ناوگان انتظار می‌رفت بسیار گزاف بود. اما آشکار بود که استفاده از همین منابع جریان برای گالوانوپلاستی (آبکاری، فلزاندایی) همیشه موفقیت دارد زیرا ارزش قطعات آب‌طلاکاری شده‌ای که با این وسیله تهیه می‌شدند در بازار همیشه بالا بود.

طی سالهای ۱۸۳۰ - ۱۸۴۰ اشخاص متعددی انواعی از موتورها با ساختمانهای گوناگون

۱. A. Pacinotti (۱۸۴۱ - ۱۹۱۲): فیزیکدان و مخترع ایتالیایی.

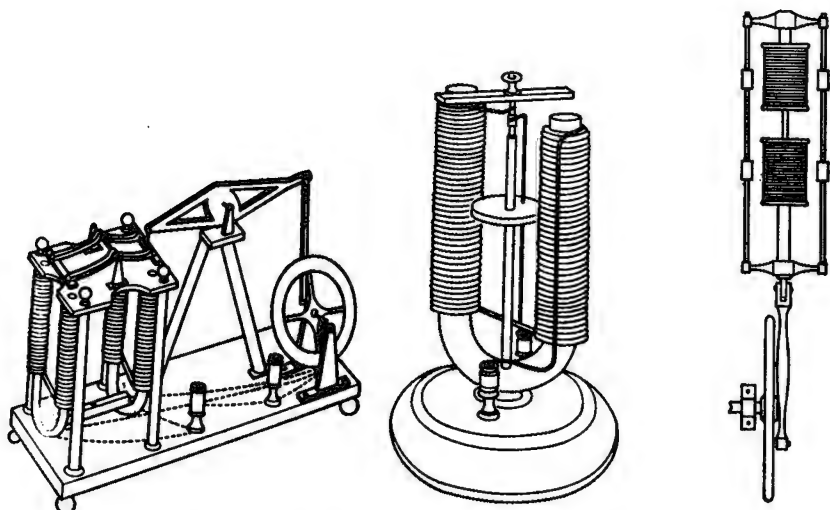


شکل ۱۲. موتور برقی الیاس (۱۸۴۲). حلقه بیرونی ثابت است؛ حلقه درونی حول محور خود می‌گردد.

طرح کردند. اما همگی از نیروی جاذبه و دافعه میله‌های آهن‌پا شده بوسیله مغناطیسهای برقی بهره گرفته بودند؛ در مدار برقی آنها جریانی که پیلها ایجاد می‌کردند با هر فاز معکوس می‌شد. از میان نام‌هایی که به یک یا چند تا از این اختراعات عقیم مربوط می‌شوند می‌توان از تامس دونپورت<sup>۱</sup>، جیمز پرسکوت ژول و آقای پ. الیاس<sup>۲</sup> هلندی نام برد.

در موتور ساخت آقای الیاس دو ردیف سیم‌پیچ روی دو حلقه هم مرکز از آهن نرم گذاشته شده بود که یکی ثابت و دیگری متحرک بود. حلقه ثابت، شش قرقره داشت که یک در میان در جهات مخالف یکدیگر پیچیده شده بودند و بنابراین شش جفت قطب مغناطیسی در آن بود. حلقه متحرک نیز همین وضع را داشت. کموتاتوری جهت جریان را در بوبینهای حلقه متحرک، زمانی که این حلقه به اندازه یک ششم محیط خود گردیده بود، معکوس می‌کرد (شکل ۱۲). این سیستم نیز برگشت‌پذیر است، اما مانند موتور یاکوبی، جزئیات مکانیسم مهم آن روشن نیست.

می‌بایست بویژه از آقای پیچ نام ببریم که نخستین مخترعی بود که از مغناطیسهای برقی استفاده کرد که هسته‌هایی را که عمیقاً فرو می‌رفتند جذب می‌کردند. در یکی از نمونه‌ها، هسته‌ها روی یک محور عمودی کار گذاشته شده بودند که از میان سولنویدهایی که از این سر تا آن سر امتداد داشتند، می‌گذشت. این محور روی قابی عمودی، متصل به بازوی یک لنگ، بسته شده بود.



شکل ۱۳. موتور برقی پیچ، با شکل ۱۴. موتور برقی پیچ، با میله شکل ۱۵. موتور برقی پیچ، با هسته‌های فرورونده. مغناطیسی دورانی. مغناطیس نوساندار.

به شباهت ساختمان این موتور با ماشین بخار شاهنگی توجه کنید.

بر اساس حرکت رفت و برگشتی این قاب، هسته‌ها متناوباً در سولنویید (سیملوله) مربوطه فرو می‌رفتند (شکل ۱۳).

پیچ طی یک دهه نمونه‌های متعددی از موتورهای برقی ساخت. در همه آنها یا حرکت دورانی (شکل ۱۴)، یا حرکت نوسانی یک آهنربا (شکل ۱۵) وجود داشت. در مورد اخیر، چهره آشنای ماشین بخار شاهنگی نمایان است. وی حدود سال ۱۸۵۰ توانست موتورهایی بسازد که توان آنها حدود ۸ تا ۲۰ اسب بخار بود و از آنها برای کشیدن یک لوکوموتیو آزمایش شد.

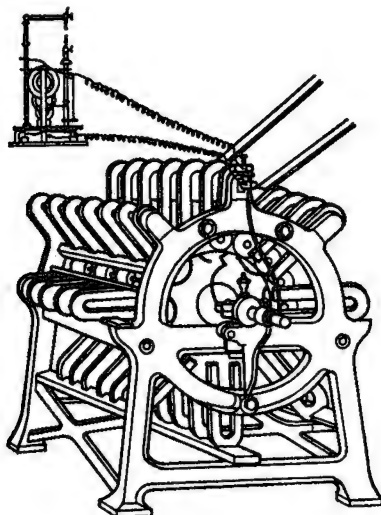
در فرانسه، سازندگان متعددی نظیر آقایان بوربوز، لارمانژ، فرومان نیز درصدد به‌کار گرفتن انرژی برقی برآمدند. بویژه گوستا و فرومان بود که در سالهای ۱۸۴۴ - ۱۸۴۸ این امکان را نشان داد. وی تقریباً ده آرایش گوناگون را، که بعضی از آنها اگر هم زیاد کارا نبودند اما اصیل بودند، مورد آزمایش قرار دارد: چون مدل‌های وی به اصطلاح برون - چرخزادی بودند که در آنها بوبینه‌های

مغناطیسی برقی که به طور شعاعی قرار گرفته بودند ایجاد یک ستاره می کردند، جاذبه آهنرباهای دائم که درون تاجی محیط پر تاج دیگر قرار داشتند قرقه ها را وادار به گردش می کرد و برای کار معکوس، تاج آهنرباهای دائم متحرک بود و تاج مغناطیسهایی برقی ثابت می ماند. مدل های دیگری هم ساخته است که ساختار کلی ماشینهای بخار افقی یا عمودی را تداعی می کردند. معلوم شده است (مجلد سوم، صفحه ۵۵۹) که موتورهای فرومان از موتورهای کمیاب دارای مغناطیسهایی برقی این دوره به شمار می آیند که به طور مؤثری کار می کردند. فرومان هم از این موتورها برای هدایت دستگاه تقسیم یا مدرج سازی در کارگاههای خود استفاده می کرده است.

دستگاههای بزرگ نخستین: در فرانسه و انگلستان ساخت دستگاههای بزرگ مغناطیسی برقی بستگی به حل مسأله کاربرد قوس برقی برای روشن سازی فانوسهای دریایی داشت. در سال ۱۸۴۱ آقای ایلدکینگتن<sup>۱</sup> صنعتگر بیرمنگامی برای استفاده از مولدهای با مغناطیسهایی برقی به جای پیل های شیمیایی برای آبکاری (فلزاندایی) کوششهایی به عمل آورد. اما آزمایشهای وی تا ده سال رضایتبخش نبودند. در همان اوان آقای فردریک ه. هولمز<sup>۲</sup> در انگلستان و فلوریز نوله در بلژیک بر آن شدند که برای روشن سازی از مگنت استفاده کنند. روش آنها کاملاً با گذشت تفاوت داشت. آقای نوله، استاد مدرسه نظام بروکسل، در نظر داشت ماشین سنتی آقای سکستن یا کلارک را جهت الکترولیز مقدار زیادی آب تکمیل کند. هیدروژنی که بدین ترتیب به دست می آمد قرار بود برای روشن سازی مشتعل شود. وی بررسیهای خود را در سال ۱۸۴۹ آغاز کرد و در ۱۸۵۳ نخستین اختراع را به ثبت رسانید. ظاهراً نوله باید در همین سال مرده باشد اما یکی از کارگران وی با نام ژوزف وان مالدرن<sup>۳</sup> پیگیر کار او شد و آن را موفقانه به انجام رسانید.

کمی شگفت آور است که بر پایه طرح نوله، در باب روشن سازی یا هیدروژن، در زمانی که کار روشن سازی با گاز زغال سنگ اهمیت یافته بود، یک شرکت سرمایه گذاری برای این کار تشکیل شد و ماشین تازه که به نام شرکت آلیانس خوانده شد لزوماً بوسیله یک ماشین بخار به گردش درآمد. در واقع طرح اصلی بی درنگ کنار گذاشته شد و ماشینهای ساخته شده، لامپهای قوسی را مستقیماً روشن می کردند.

مولد آلیانس حاوی هیچ نوآوری نبود و صرفاً طرحی را که به اشکال مختلف پیاده شده بود تکرار می کرد: آهنرباهای دائم را که به طور شعاعی در تاجهای دارای تعداد زیادی قرقه قرار داشتند میان تاجهای ثابت به گردش درمی آورد. روی دستگاه مالدرن ۱۶ قرقه برای هر تاج متحرک گذاشته شده بود که در برابر قطبهای هشت آهنربای دائم می گردیدند (شکل ۱۶). بزرگترین دستگاه از



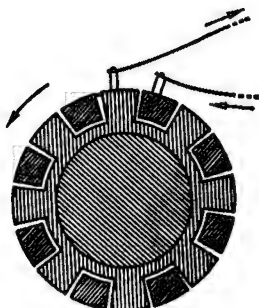
شکل ۱۶. ژنراتور آلیانس.

تاج ثابت آهنرباهایی دائم به شکل نعل اسبی دیده می شود و نخستین تاج گردان حامل قرقره ها تشخیص داده می شود. تسمه نقاله به ماشین بخار اتصال دارد مولد یک لامپ قوسی را روشن می کند

این نوع دارای شش آرماتور گردان و شش آرماتور ثابت بود که جملگی حول یک محور افقی و یک سکوی چدنی کار گذاشته شده بودند. هنری که در این دستگاه به کار رفته بود مربوط به طرز اتصال سیمهای قرقره ها و تشکیلات یک کموتاتور سنگین دارای کولکتور برای فراهم ساختن جریان مستقیم در مدار می شد (شکل ۱۷).

پس از چندین بار نمایش روشن سازی در حضور مردم پاریس و لندن با یک ناظم سرن، دو دستگاه بزرگ آلیانس در سال ۱۸۶۳، همان طور که در پیش دیدیم، در چراغ دریای دماغه او، در نزدیکی لوهاور گذاشته شدند.

آقای هولمز در همان زمان به نتایج مشابهی رسید. وی در سال ۱۸۵۳ اندیشیده بود که لامپهای قوسی می توانند با برق یک دستگاه بزرگ مغناطیسی برقی روشن شوند و سه سال پس از آن امتیاز دستگاهی را به ثبت رسانید که شش دیسک گردان داشت که هر کدام هشت مغناطیس برقی را حمل می کرد؛ به عبارت دیگر، او شانزده قطب را فعال ساخته بود که با شانزده قطب هشت آهنربای دائم که نقش القاگر را داشتند، مربوط می شدند.



شکل ۱۷. جزئیات جابه‌جاگر (کومتاتور) ژنراتور آلیانس.

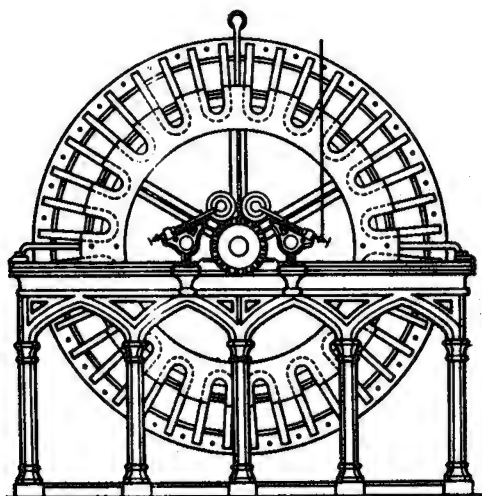
این قطعه به عنوان یکسوکنده جریان عمل می‌کند. شامل دورتور است که در یک جهت حول یک محور می‌گردند. دندانه‌های یکی از آنها در چاکهای دیگری قرار دارد.

در واقع میان مولد وان مالدرن و مولد هولمز تفاوت چندانی نبود. این مولدها تنها از نظر شکل آهنرباها، سکوی چدنی و نیز آرایش کومتاتور، یا کولکتور-یکسوکنده جریان با یکدیگر تفاوت داشتند (شکل ۱۸). با این همه هولمز در سال ۱۸۵۷ به مقامات صلاحیتدار پیشنهاد کرد که از مولد او برای روشن‌سازی چراغ دریایی با ناظمهای قوسی استفاده شود.

وی پس از یک نمایش، نوع دیگری از این دستگاه را طرح کرد که روی آن مغناطیسهای برقی روی سکوهای ثابت و آهنرباهای دائم روی دیسکهای گردان قرار داشتند.

آقای هولمز این دو فرمول را با تغییراتی کوچک روی دستگاههای متعددی پیاده کرد. در سال ۱۸۶۲ چراغ دریایی دوزانس<sup>۱</sup> که روی پا دوکاله کار گذاشته شد با برق روشن می‌شد و هولمز تمام آن، از جمله ناظم قوسی آن را با الهام از کار سرن ساخته بود. چنین می‌نماید که این آزمایش نیز مانند آزمایشهای پیش از آن نتیجه رضایتبخشی نداشت. این دستگاه برقی پس از ۱۲ سال کار ناپیوسته، در سال ۱۸۷۴ با یک لامپ روغنی معمولی تعویض شد. اما در فرانسه دستگاههای آلیانس تا مدتها پس از اختراع دینام به‌کار خود ادامه می‌دادند.

این درست است که این دستگاهها طی زمان تغییراتی را متحمل شدند. بویژه تغییراتی که آقای مریتانس<sup>۲</sup> در سال ۱۸۷۸ وارد کرد از مکانیسم حلقه گرام-پاچینوتی الهام گرفته بود و آن سیم‌پیچی بود که چند سال پیش از آن اختراع شده بود و بعدها از آن سخن خواهیم گفت. حلقه مریتانس، صاف و هسته آن از ورق نازکی تشکیل شده بود. این حلقه برخلاف حلقه‌های مخترعان



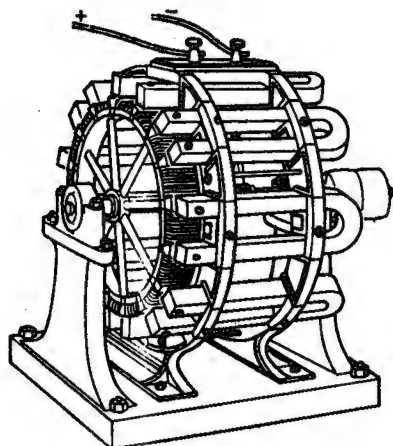
شکل ۱۸. مولد فردریک ه. هولمز (۱۸۵۸).

در این مدل، آهنرباهای دائم در جهت مخالف آهنرباهای مولد آلیانس گذاشته شده‌اند. در وسط، یکسوکننده جریان از همان نوع است. از دو روتور کوچک تشکیل شده‌اند. میله عمودی در وسط تصویر به یک ناظم گلوله‌ای (مرکز‌گیر) وصل شده‌است، و با برگردانیدن تسمه، جای کلکتورها را معین می‌سازد.

دینام صنعتی در تمام طول تاج یکپارچه نبود و به چند قطعه تقسیم شده بود. روی هر کدام از این قطعات، سیم‌پیچ در یک گودی که انتهای تیزی داشت گذاشته شده بود. مریتانس همان‌طور که گرام پیش از وی عمل کرده بود از آهنرباهای دائم از نوعی که ژامن<sup>۱</sup> به‌کار برده بود استفاده کرد، یعنی از ورقهای فولادی چسبیده به هم که مجموعاً شکل نعل اسب می‌یافت. این آهنرباها به‌طور شعاعی، مانند دستگاه مالدرن یا مماس با تاج القاگیر گذاشته می‌شدند (شکل ۱۹). استفاده از آهنربای ژامن امکان داد که میدان مغناطیسی بسیار نیرومندتر از میدانهای معمولی حاصل از میله‌های ستبر، ایجاد شود.

آقای مریتانس بدون درنگ، باز به تأسی از گرام، در محدوده ماشین خود و به کمک دینام خود به گردآوری جریان متناوب پرداخت. برتری این نوع تغذیه دستگاههای ناظم قوسی آشکار بود، گرچه این آشکاری حدود سی سال دیده نمی‌شد. هردو میله زغالی همزمان و منظمآ فرسایش

۱. Jamin، ژول سلستن (۱۸۱۸ - ۱۸۸۶): فیزیکدان فرانسوی.



شکل ۱۹. مولد الکترومغناطیسی مریتانس (۱۸۷۸).

آهنرباهای دائم از نوع ژامن تشکیل تاج ثابتی داده‌اند که حلقه با سیم‌پیچ گسسته را به طور مماس دربرگرفته است.

داشتند درحالی‌که در صورت تغذیه با جریان مستقیم، تنها یک زغال فرسوده می‌شد و نوک آن از شکل می‌افتاد. آلیانس انواع گوناگونی از دستگاههای مریتانس ساخت که از جمله آنها، مولدهای جریان مستقیم بود که هم برای روشن‌سازی و هم در کارخانه‌ها کاربرد داشتند. این دستگاهها حدود سال ۱۸۹۰ در برابر دینامها و تناوبگر (آلترناتور)ها واپس نشستند.

راه‌حلهای جزئی به‌سوی دینام: دستگاههای دیگری که در همان اوان یا کمی بعد اختراع شدند تجسم تحولی هستند که پیدایش دینام مرهون آن است.

آقای وررن فون زیمنس در سال ۱۸۵۶، مگنتی با توان کم را طرح کرد که با دست کار می‌کرد تا زنگ شروع تلگراف را به صدا آورد. زیمنس بر خلاف پیشینیان خود تنها از یک سیم‌لوله (سولنویید) صاف با مارپیچی چهارگوش، مانند مارپیچهای یک گالوانومتر، استفاده کرد. این سیم‌لوله را بین قطبهای آهنربا قرار داد تا حول محور بزرگ خود بگردد. دو شاخ نعل اسبی این آهنربا به توسط «کفشکهای قطبی» فرسوده شده به درون استوانه فرو می‌رفتند تا القاگیر را بپوشانند.

دستگاه قرقره‌ها نیز ویژگیهای جالبی را نمایش می‌داد. هسته‌ای استوانه‌ای از آهن نرم که از درون قرقره‌ها می‌گذشت دو شیار عمیق به‌صورت ضربدری داشت که سیم‌پیچی درگودی آنها کار گذاشته شده بود. این هسته با محور گردش، یکی شده بود.





شکل ۲۰. القاگیر ماکو شکل زیمنس

الگوی زیمنس از نظر طرح یک مدار مغناطیسی بسته، که بین کفشکهای قطبی و القاگیر آن تنها فاصله کمی وجود داشت، جالب است. شکل کشیده القاگیر نیز، آن بخش از رساناها را که نزدیک قطبها می‌گردیدند بسیار بااهمیت می‌کرد. زیمنس آن را *döpple T Anker* یا لنگر تیرآهنی می‌نامید و وجه تسمیه آن نمای مقطع عرضی هسته بود. این القاگیر را ماکویی هم می‌نامند زیرا شکل آن ماکوی بافتدگی را تداعی می‌کند (شکل ۲۰).

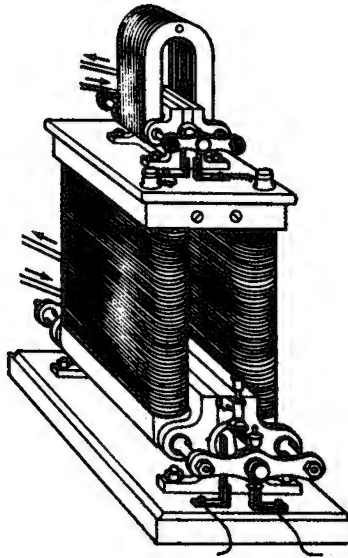
هشت سال بعد، در ۱۸۶۴ آقای هنری وایلد<sup>۱</sup> می‌خواست از یک مولد کوچک زیمنس برای تحریک آن عده مغناطیسهای برقی استفاده کند که در مولدهای پرتوان وی به جای آهنرباهای دائم، نقش القاگر را داشتند. این مگنت زیمنس در بالای دینام نصب شد و تسمه و یژه‌ای با کمک دستگاهی شبیه همین مولد کشیده می‌شد (شکل ۲۱). فیزیکدانی از دانمارک با نام سینستدن<sup>۲</sup> در سال ۱۸۵۱ طرح این وسیله را پیشنهاد کرده بود اما گویا آن را نساخت. اختراع این وسیله را در آن زمان می‌توان گواه یک تحول مؤثر، گرچه بسیار آهسته طرحهای مربوط به ساختار و آثار درونی مولدهای دانست. در این دستگاه همچنین می‌توان امتداد این تحول را در ماشینهایی که تقریباً در یک زمان، در ۱۸۶۷ بوسیله ویستون، ورنر فون زیمنس و س. ا. وارلی<sup>۳</sup> ساخته شدند، دید. بحث مربوط به دینامی است که بوسیله جریانی که در قرقره‌های القاگر آن می‌گذرد راه اندازی می‌شود. القاگرهای خود راه‌انداز به نظر مخترعان آن این برتری را دارند که توان جریانی را که مولد تولید کرده است می‌افزاید.

این سه مخترع در توضیحات نخستین خود، لزوم مغناطیسی کردن قبلی الکترودها بوسیله یک منبع برق خارجی را تأکید می‌کردند (شکل ۲۲). بخوبی روشن است که زیمنس نخستین کسی بود که ثابت کرد که پس از اینکه این عمل انجام گرفت مغناطیس مانده در هسته‌های الکترودهای القاگر، کار تحریک برای راه‌اندازی را تأمین می‌کند.

چند هفته بعد، فیزیکدان انگلیسی دیگری، به نام ویلیام لدا<sup>۴</sup>، در این راه پیشرفت بیشتری را

۱. H. Wilde (۱۸۳۳ - ۱۹۱۹): مهندس انگلیسی برق

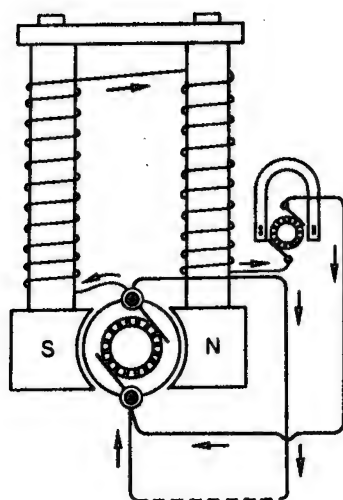
2. Sinsteden 3. S.A. Varley 4. W. Ladd



شکل ۲۱. دینام وایلد (۱۸۶۴).

مگنتی از نوع زیمنس که در بالای القاگرها جاسازی شده است و آنها را راه اندازی می‌کند. تسمه‌های هر دو القاگیر از روی یک محور حرکت‌دهنده می‌گذرند.

نشان داد. آقای لَد در ماه مارس ۱۸۶۷ ماشینی به نمایش گذاشت که در آن زمان به نام وی شهرت یافت. این ماشین دارای دو القاگیر زیمنس بود که بین قطبهای دو آهنربای مغناطیسی صاف می‌گردیدند. القاگیر کوچکتر قرقره‌های القاگر را تغذیه، و القاگیر بزرگتر، جریان مدار را تأمین می‌کرد. آقای لَد، دو ماه بعد اظهار داشت که از تحریک نخستین که زیمنس لازم می‌شمرد، می‌توان چشم پوشید و مغناطیس طبیعی آهن نرم، در همان نخستین اثر برای تحریک قرقره‌ها کافی است. دیده می‌شود که آزمایشهای متعدد و ساختهای گوناگون طی این سالها رفته‌رفته به طرح آقای گرام انجامید که اقدامات مخصوص خود را آغاز کرده و در شرف به‌کارگرفتن آن بود.



شکل ۲۲. نمایش تحریک القاگرها بوسیله مدار منشعب از یک مغنت.

## نوآوری برق صنعتی

### پیدایش و پیروزیهای دینام

فیزیکدانان، ابزارسازان و مخترعان در دهه ۶۰ کوششهای بسیار فشرده‌ای روی مولدها به عمل آوردند. مرور راه‌حلهای بسیاری که در این مدت کوتاه پیشنهاد شدند ممکن نیست، اما نتیجه همه آنها طرح اولیه‌ای بود که با ساخت نخستین دینامهای تسنوبه گرام<sup>۱</sup> پیشنهاد شد.

دو دهه پس از آن (۱۸۷۰ تا ۱۸۹۰) وقف اختراعی است که بدرستی می‌توان آن را برق صنعتی نام نهاد و دستاوردهای زیر: گذر از مولدهای الکترومغناطیسی به دینامها، کشف برگشت‌پذیری ماشینهای اخیر و به‌کارگرفتن موتورهای برقی، آزمایشهای اولیه درباره انتقال جریان برق و ساخت ترانسفورماتور (مبدل)ها از مشخصات این دو دهه هستند. دیده می‌شود که این اختراع در واقع، آفرینش پیوسته‌ای است که افراد زیادی در آن سهم بوده‌اند. وانگهی این آفرینش در دوره‌ای از تحول تکنیکها و فعالیت اقتصادی صورت گرفته که همه شرایط لازم برای گذار پرشکوه و سریع آن فراهم بوده است.

1. Zénobe Gramme

نقش گرام: آغاز قطعی برق صنعتی را بدرستی به گرام نسبت می دهند. نوآوریهای وی عبارتند از الفاکیر (آرمیچر) حلقوی با سیم پیچ پیوسته و «کلکتور»ی که بی شبهه طرح شخص وی بوده است. در حقیقت روشن نیست که کارهای او در این زمینه، که پس از ده سال به پیروزی قطعی انجامید، در چه شرایط فکری و مادی انجام گرفته اند.

گرام که تبار بلژیکی داشت فاقد استعداد ادامه زیاد تحصیل در مدرسه بود. وی در ۱۸۵۵، زمانی که تقریباً سی سال داشت، برای زندگی کردن به پاریس و به عنوان سازنده قالب و میل دست به کار شد. او در این شغل برای کارگاه کریستوفل<sup>۱</sup> قالبهایی ساخت که از اختراعات به ثبت رسیده الکینگتن و روتولز<sup>۲</sup> در ساختن قالبهای قطعات زرگری با روش آبکاری برق شیمیایی استفاده می شد. او بناچار برای شرکت آلیانس نیز کار می کرد. ماشینهای این شرکت، قطعات اساسی متعددی از چوب داشت که باید بدقت تهیه می شدند. آقای گرام با مؤسساتی که از تکنیکهای نوین برقی برای دو رشته بسیار فعال آن زمان استفاده می کردند، نیز مربوط شد: گالوانوپلاستی و روشن سازی با برق. بدون شبهه اطرافیان وی از مدلهای گوناگون مولد مغناطیسی برقی، که حرفه ای کم و بیش کوتاه مدت شده بود زیاد صحبت می کردند. آقای الکینگتن در انگلستان، لااقل به طور جزئی برای تغذیه لگن گالوانوپلاستی خود از مگنت استفاده می برد و آقای کریستوفل در پاریس با نواقص پیلهای بزرگ برقی دست و پنجه نرم می کرد. نواقص ماشینهای وان مالدرن غالباً می بایست رفع و رجوع می شدند و پس از اشتغال گرام، انتظار آن می رفت که مغز کنجکاو وی همراه بلندپروازیش، - برای اینکه او هم بنوبه خود نوع تازه ای مولد عرضه کرده باشد، و بالاخره داشتن دستهای آزموده، قدرت تشخیص و روحیه عملگرایی، او را تشویق کنند - بدین میدان گام نهد.

گویا او لااقل در آخرین مراحل کارهایش از راهنماییهای چند فیزیکدان بسیار آگاه با گرفتن اطلاعات علمی از برق معاصر از آنها بهره گرفته باشد. گرچه وی این احتمال را رد می کند و بدلیل گذشته اش شخصیتی ساده لوح و خصوصیتی خشن داشته است و بدین جهت افسانه هوشمند نابغه با وی سازگار نیست و تنها می توان پذیرفت که با نوشته های علمی مربوط به برق آشنا بوده است و می توانست نتایج همکاران خود را در اختراعات برقی تحلیل کند. آقای گرام در واقع از یک خانواده بسیار تنگدست اما با سواد برخاسته بود و در جوانی هم علاقه ای به تحصیل نداشت و محققاً بیشتر به کار دستی متمایل بود تا مطالعه. سرانجام باید به یاد آورد که پیش از سال ۱۸۶۰

۱. Christoffe، شارل (۱۸۰۵-۱۸۶۳)، صنعتگران فرانسوی، پایه گذار زرگری کریستوفل در پاریس.

۲. Ruolz، هانری دو (۱۸۱۱-۱۸۸۷)، فرانسوی؛ وی با الکینگتن انگلیسی روش خاصی برای آب نقره دادن ابداع کرد که به نام خود اوست.

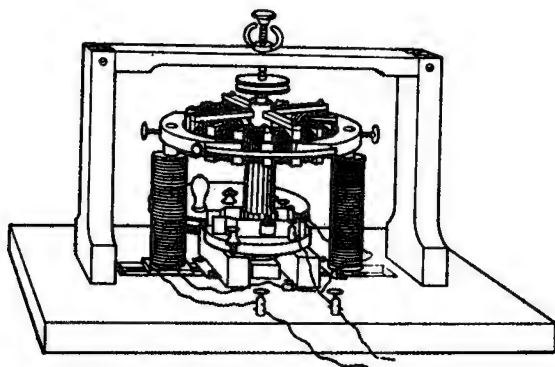
هم، کاربرد مغناطیسه‌های برقی، برای القا مورد بحث بوده اما در سالهای پس از آن مورد استفاده قرار گرفته است.

پیشگامی پاجینوتی: در پایان باید گفت که دستگاه پاجینوتی؛ گواه روشنی است که این اندیشه را می‌توان شکاری در تیررس دانست. آقای آنتونیو پاجینوتی در پیسا استاد فیزیک بود و زمانی که نخستین دینام را ساخت برای کارهای آزمایشی بود. این دانشمند ایتالیایی بر آن بود که موتوری بسیار بهتر از موتورهای آقای فرومان بسازد. اما حتی پیش از آنکه آن را به نمایش گذارد به برگشت‌پذیری آن واقف بود، بدین معنی که این ماشین با تغذیه از جریان یک پیل، همچون موتور کار می‌کرد، اما چنانچه آن را به مدار بسته‌ای اتصال می‌دادند و روتور آن را به‌طور مکانیکی می‌گردانیدند ایجاد برق می‌کرد.

دستگاه پاجینوتی اساساً، در ده سال پیش از دستگاه گرام مشخصات اصلی دینام دستگاه گرام را داشته است (شکل ۲۳). القاگیر آن حلقه‌ای از آهن نرم بود که در فواصل منظمی برجستگیهایی به خارج داشت. این حلقه، سیم‌پیچی متشکل از ۱۶ قرقره را حمل می‌کرد و ماریپچه‌های آن جملگی در یک جهت بودند. سیم خروجی یکی و سیم ورودی بعدی به یک رسانای کلکتور متصل می‌شدند. بدین ترتیب هر قرقره به توسط یک صفحه نازک مسی که روی استوانه چوبی کوچکی کوئیده شده بود به کلکتور مرکزی که پاجینوتی آن را کموتاتور می‌نامید، اتصال داشت. دو کلکتور روی این استوانه چوبی به شکل ضربدری گذاشته شده بودند. القاگر از دو مغناطیس برقی تشکیل می‌شد که پاجینوتی به کمک یک منبع خارجی آن را تحریک می‌کرد. زمانی که این دستگاه قرار شد به عنوان مولد کار کند، دو مغناطیس برقی را با دو آهنربای دائم عوض کردند.

دیده می‌شود که پاجینوتی هر دو راه حل مهم ساخت دینامهای صنعتی را داده است: حلقه با سیم‌پیچی پیوسته، و کلکتور (که وی آن را کموتاتور می‌نامید). اما وی اصل راه اندازی اتوماتیک (یا با لفظ آن زمان surexcitation) را نیندیشیده بود. وانگهی کارهای پاجینوتی بکلی نادیده گرفته شدند. دستگاه وی در سال ۱۸۶۱ ساخته شد و توضیح آن در یک مجله ایتالیایی با تیتر او کم با نام *Il Nuovo Cimento* در ۱۸۶۴ به چاپ رسید. در این زمان گویا تقریباً در هر ماه در مجلات علمی کشورهای گوناگون مقاله‌ای درباره یک ماشین جدید دیناموالکتریک چاپ می‌شد و تعداد زیادی از ماشینهای جدید نیز موقتاً نادیده گرفته می‌شدند. وانگهی شهر پیسا یک مرکز صنعتی نبود و هیچ‌یک از سرمایه‌داران از محسّنات ماشین پاجینوتی اطلاع نیافتند.

با این همه، پس از موفقیت‌های دینام گرام، انتشارات این دانشمند ایتالیایی بازخوانی و غالباً



شکل ۲۳. دستگاه پاچینوتی.

حلقه القاگیر بین قطبهای باز شده دو القاگر عمودی، به طور افقی کار گذاشته شده است. در پایین، محور القاگیر «کموتاتور» با دو کلکتور آن دیده می شود. در پشت، میل لنگی است که دستگاه را به مولد تبدیل می کند.

تفسیر شد. گرچه اختراعات گرام و پیروان متعدد وی به طور گسترده ای مورد دستبرد قرار نگرفتند، مکانیسمهای اساسی آنها در مراکز معمولی و بوسیله بعضی صنعتگران، مانند مریتانس به کار گرفته شدند.

پیدایش دینام گرام: نخستین آزمایشهای تسنوبه گرام بمنظور اصلاح مدلهای دستگاههای شناخته شده آن دوران بود. بنابراین در سال ۱۸۶۵ یک کپی از دستگاه پیچ ساخت که القاگر آن یک مغناطیس برقی افقی بود. سپس گویا متوجه شد که یکی از راه حلهای مشکلات در طرز ساخت حلقه دارای سیم پیچ پیوسته نهفته است. مدتها بود که از یکی از این حلقه ها که تاریخ ۱۸۶۸ را بر خود داشت استفاده می شد. ورق نازکی از آهن نرم را به شکل حلقه جوش داده بودند و تعدادی قرقره تنگ هم چیده شده آن را در میان می گرفتند. دو سر سیم را روی آن به یکدیگر جوش داده بودند. این حلقه روی یک چوب گردان حمل می شد و جاروبکها، به شکل ضربدری مستقیماً با تکه ای از سیم لخت ماریچی اصطکاک می یافتند. دو سال بعد، گرام، سیم پیچی از قرقره های مجزا از هم طرح کرد که سیمهای ورودی و خروجی آنها به سیمهای ورودی و خروجی بوبین مجاور به واسطه ورقه نازکی از آلایز برنج لحیم شده بود. - مکانیسمی که طرح اولیه کلکتور را تشکیل می داد. پاچینوتی این طرح را در سال ۱۸۶۱ پیشنهاد کرده بود. نخستین دستگاه گرام با

چهار قطب و القاگری از دو مغناطیس برقی همان بود که آقای ژول ژامن در ماه ژوئیه سال ۱۸۷۱ به آکادمی علوم فرانسه ارائه داشت و مجهز به چنین حلقه و کلکتور بود.

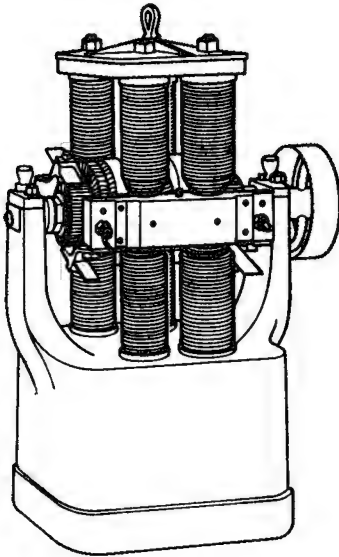
گرام تا این سال، تنها مگنتهای دارای آهنربای دائم برای اجرای آزمایشهای خود ساخته بود. شرکتی صنعتی که سرمایه آن را کنت ایورنوا<sup>۱</sup> تأمین کرده و مدیریت آن به عهده ایپولیت فونتن بود برای به کارگیری اختراعات ثبت شده گرام در زمستان ۱۸۷۰ - ۱۸۷۱ تأسیس شد. اما انواع اولیه بازاری و بویژه مگنتهای مجهز به حلقه نوع تازه را کارگاه لویی برگه می ساخت. از سوی دیگر، چنین می نماید که شرکت گرام - فونتن در سالیان نخستین فعالیت خود، حقوق اختراعات خود یا لاقط بخشی از آن را به عده ای از سازندگان غیرحرفه ای از قبیل: لویی برگه، سوتر - لمونیه<sup>۲</sup> یا مینیون و روار در فرانسه و کارگاههای متعدد دیگری در کشورهای دیگر وا گذاشت. بر روی هم آقای گرام هشت اختراع را به ثبت رسانیده بود.

نخستین دستگاه گرام: مدل القاگیر با کلکتور آن که دو جاروبک با آن اصطکاک می یافتند، به طور قطعی در سال ۱۸۷۲ برای ماشینینی با چهار مغناطیس برقی و با چهار قطب به کار گرفته شد. قطبها دوه دو بودند و در آن زمان آنها را قطب برآیند می نامیدند (شکل ۲۴). برپایه مشخصات مورد نظر مشتری، دینام باید جریانی تأمین می کرد که برای رسوب دادن ۶۰۰ گرم نقره در یک ساعت روی اشیاء برنجی کافی باشد. گرام بدون استفاده از هیچ فرمولی توانست دستگاه خود را محاسبه کند و با توان ۷۵ کیلوگرم، نتیجه دلخواه را به دست آورد (شکل ۲۵).

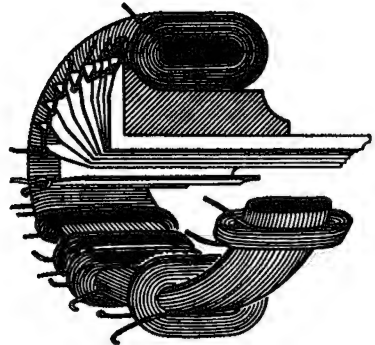
شرکت ماشینهای الکترومغناطیسی گرام بی درنگ انواع متعددی دینام عرضه کرد: مدلی با چهار قطب و چهار مغناطیس برقی عمودی، و نیز چندین نوع فرعی از این مدل با دو مغناطیس الکتریکی که به طور افقی جاسازی شده بودند با تعدادی کفشک قطب لفافی (شکل ۲۶). هرکدام برای کار خاصی ساخته شده بودند: گالوانوپلاستی، روشن سازی با لامپ قوسی و بالاخره ویژه کارگاه. قرقره های القاگر روی همه مدلهای، یا به طور زنجیری (شکل ۲۷) یا به شکل موازی با قرقره های القاگیر (شکل ۲۸) نصب می شدند تا به توسط جریان دینام تحریک شوند. تحریک اتوماتیک برای راه اندازی بوسیله مغناطیس مانده تأمین می شد. در این مکانیسم اصول مورد نظر گرام در سال ۱۸۶۸، بروشنی رعایت شده است. القاگیرهای همه این مدلهای بر همین پایه ساخته می شدند، هسته این حلقه، دسته ای میله های نازک فولادی بود که در سیستم قرقره های ساخته شده از سیمهای مسی گنجانیده شده بودند.

هسته تشکیل شده از میله های فولادی، این مزیت را داشت که جریان فوکو (یا گردابی) را



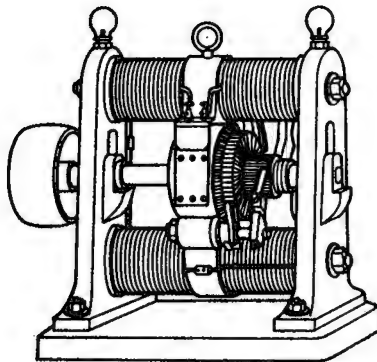


شکل ۲۵. دستگاه گرام با چهار قطب، که در سال ۱۸۷۲ برای کارگاه زرگری کریستوفل ساخته شد.

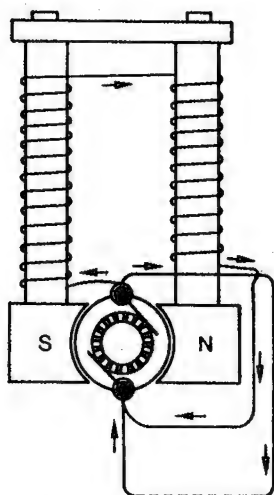


شکل ۲۴. مقطع القاگیر (مشهور به حلقه گرام) (۱۸۷۲).

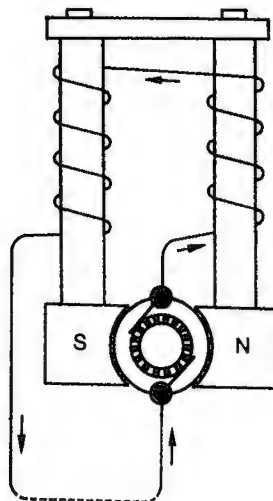
در این مقطع، هسته که از تعدادی میله های آهن نرم تشکیل شده است و نیز سیم پیچهای متشکل از قرقره ها و نیز ورقهای برنجی که کلکتور را تشکیل می دهند دیده می شوند.



شکل ۲۶. دینام گرام، مشهور بنوع A کارگاه (۱۸۷۴).



شکل ۲۸. نمایه اتصال موازی القاگرها (دینام شنتی).



شکل ۲۷. نمایه اتصال زنجیری القاگرها (دینام زنجیری).

حذف می‌کرد. کلکتور، شکل کلاسیکی داشت که مدت‌ها آن را حفظ کرد. هر دو جاروبک همچون فرجه‌ای از سیم‌های برنجی عمل می‌کردند که به شکل ضربدری با فرجه‌ای نسبت به خط قطبها گذاشته می‌شدند، زیرا اعوجاج میدان القاگیرگردان در نظر گرفته شده بود. کاربرد جاروبک از سیم برنجی سبب کاهش بسامد (فرکانس) و شدت جرقه‌های برقی می‌شد. با این حال، تولید جرقه‌ها در بستهای کلکتور بازیکی از مشکلات بسیار پیچیده‌ای بود که نخستین تکنسین‌های برق باید بر آن غلبه می‌کردند.

سرانجام ساختار کلی دستگاههای گرام، بویژه بدنه آنها، موتورهای محکمی بودند که معمولاً چندین ده سال بدون هیچ حادثه‌ای کار می‌کردند.

موارد موفقیت برگشت‌پذیری: حوادث متعددی موجبات موفقیت سریع دینامها و به‌طورکلی دستگاههای گردان را فراهم آوردند. نخست، آشکار شدن برگشت‌پذیری این دستگاه بود. این نمایش در دو مرحله انجام گرفت که مرحله دوم ظاهراً ربطی به مرحله اول نداشت.

در ۱۹ ماه مه ۱۸۷۳ دو فیزیکدان به نامهای نیوده<sup>۱</sup> داماد لویی برگه، و پلاتنه در برابر اعضای آکادمی علوم فرانسه آزمایشی را اجرا کردند که نشان می‌داد که دینام می‌تواند نقش موتور را هم

1. Niaudet

داشته باشد اما نمی‌تواند بوسیلهٔ دینام دیگری به‌کار افتد. این دستگاه نخست برای شارژ کردن یک آکومولاتور پلانته به‌کار گرفته می‌شد، سپس زمانی که همهٔ نیروهای مکانیکی قطع می‌شد، بدون کمترین دستکاری در اتصالات آن، بتنهایی می‌گردید. جهت جریانی که از آکومولاتور گرفته می‌شد معکوس جهت جریانی بود که مولد برای شارژ آن داده بود. موتورهای برقی الکترومغناطیسی چندین بار به توسط منابع شیمیایی برق به‌کار افتادند و به‌نظر می‌رسد که برپاکندگانی این آزمایش استنتاجات خود را تا پایان ادامه داده باشند.

نمایش سرنوشت‌ساز در کمتر از یک ماه بعد، در ۳ ژوئن ۱۸۷۳ توسط آقای ایپولیت فونتن در نمایشگاه برق وین انجام گرفت. آقای لویی فیگیه که رابطهٔ مستقیمی با وی داشت، صحنهٔ نمایش را گزارش کرده است. یکی از بینندگان دو دستگاه گرام عرضه شده را گزارش داده است که یکی را که موتوری گازی می‌گردانید برق می‌داد و دیگری که به توسط یک پیل برقی تغذیه می‌شد به‌عنوان یک موتور کار می‌کرد. وی به آقای فونتن پیشنهاد کرد که دستگاه دوم را به مدار دستگاه نخست، متصل سازد. کار آزمایش، تعیین‌کننده بود و آقای فونتن وسیله‌ای طرح کرد که موتور دینامی می‌توانست یک تلمبهٔ هیدرولیک را به‌کار اندازد و آزمایش خود را با غرور زیاد تکرار کرد.

این داستان احتمالاً درست است و امکان می‌دهد تا بفهمیم که این آزمایشگران تا مدت‌ها با چه مانع فکری کم‌اهمیتی روبه‌رو بودند. مولدهای دارای آهنربای دائم، برق بسیار ضعیف و بی‌ثباتی می‌دادند و در اینکه یک موتور الکترومغناطیسی بتواند با تغذیه از این برق در صنعت به‌کار گرفته شود تردید بسیار وجود داشت و علت اینکه آزمایشهای مربوط به‌کار موتورها، جملگی با یک منبع شیمیایی برق انجام می‌گرفت همین بود. اما از لحاظ تئوری هیچ چیز مانع این نشد که ۳۵ یا ۴۰ سال بعد پدیدهٔ برگشت‌پذیری کشف شود. دیده شد که پاجینوتی در همان سال ۱۸۶۱ بدان برخورد کرده اما اهمیتی بدان نداده بود.

شمع یابلوچکوف: دینام گرام پس از اینکه بی‌درنگ در الکترولیز (برق‌کافت) به‌کار گرفته شد پس از مدت کمی کاربرد دیگری یافت: تغذیهٔ لامپهای قوسی. از آن در رگولاتور سرن و نیز تولید جریان مستقیم استفاده می‌شد، وسایلی که به‌علت بهای تولیدی بالا و لزوم دستکاری مکرر برای تعویض زغالهای فرسودهٔ رگولاتور، استفاده از تأسیسات دائمی روشنایی برقی برای آنها مطرح نبود. در سال ۱۸۷۶ اختراع بسیار هوشمندانه‌ای این مشکل را آسان ساخت. این اختراع از آن یک مهندس روسی تلگراف با نام پاول نیکلایویچ یابلوچکوف بود که در تاریخ گفته شده در پاریس یک «شمع برقی» ساخت که به نام وی به ثبت رسید. او دو میلهٔ زغال را به‌جای اینکه در خط مستقیم و



شکل ۲۹. نمایه شمع یابلوچکوف. در بالا، زغالهای اشتعال. نما از بالا.

روبه روی یکدیگر قرار دهد، عمودی و چسبیده به هم گذاشت. پوششی از گل رس دو میله زغال را به طوری از یکدیگر جدا می ساخت که بین دو سر بالایی آنها که در یک سطح قرار داشتند، قوسی برقی پدید می آمد. نوار کوچکی از زغال آنها را به یکدیگر اتصال می داد و درگیری قوس را تأمین می کرد. این نوار، زود می سوخت و قوس به طور پیوسته ای برقرار می شد (شکل ۲۹). برای اینکه هر دو میله زغال همزمان بسوزند، یابلوچکوف شمعهای خود را با جریان متناوب تغذیه کرد. چون سیستم وی با موفقیت روبه رو شد می توان پذیرفت که وی نخستین کسی بود که استفاده از جریان متناوب را پایه گذارد.

شمعهای یابلوچکوف در ۱۸۷۶ جهت روشنایی دائم فروشگاهها، باراندازها و خیابانهای پاریس و لندن به کار گرفته شدند. این شمعها بوسیله دستگاههای گرم که اتصال آنها برای تولید جریان متناوب ترتیب یافته بود تغذیه می شدند. آقای یابلوچکوف دستگاههای خود را تکمیل کرد و توانست تغییر خودکار شمعهای فرسوده را، که عمر کاری آنها حدود دو ساعت بود، تأمین کند. این شرکت که پشتیبان مالی در پاریس داشت نخستین شرکت ساخت وسایل برقی است که بعدها مقام بسیار مهمی در این صنعت به دست آورد - مقامی که اهمیت آن هنوز پابرجاست.

شمع یا بلوچکوف که بسیار زودتر از لامپهای معمولی برق اختراع شده بود نخستین وسیله‌ای بود که روشنایی مداومی داشت. این شمع توجه را به کاربرد برق صنعتی، که هنوز گامهای اولیه واقعی را برداشته بود برگردانید. ماشینهای گرام نخستین کاربرد صنعتی را داشتند اما همه ژنراتورهای دیگر هم که سرعت طی چند سال ساخته شدند در این راه به‌کار گرفته شدند.

نخستین تحول در مولدها: حوادثی که گرام و دینام وی در مرکز آن قرار داشت تبلور و توجیه نهضتی از تحقیقات را سبب شد که تا آن زمان بسیار نابسامان بود. گرایش نیرومندی برای بهره‌گیری هرچه بیشتر از دینام یا به عبارت دقیقتر دستگاههای دورانی الکترومغناطیسی به جای کارهای تصادفی و جستجوگریخته پدید آمد. اصطلاح دینام، پیش از گرام وجود داشت، و گویا در اواخر سال ۱۸۶۶ یا آغاز ۱۸۶۷ همزمان بوسیله وایلد و زیمنس به‌کار رفته است.

کسانی که پس از گرام در این کار موفق بودند عبارتند از ماشین‌سازانی که در آن زمان با ساختهای قبلی آشنا بودند، یعنی آقایان مریتانس و زیمنس. در گذشته دیده شد که آقای مریتانس چه تغییرات جالبی در ماشینهای آلینانس وارد کرد؛ اگرچه پیشرفت وی زیاد نبود.

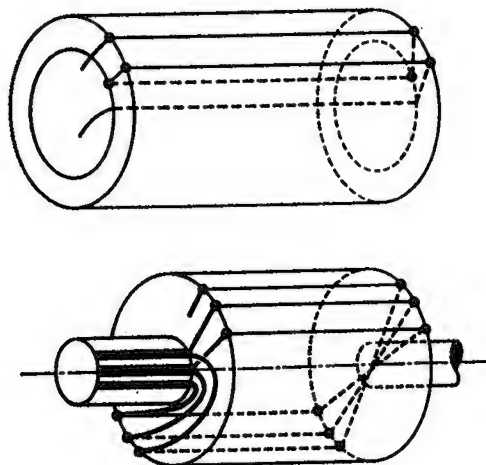
دستاورد بنیاد زیمنس و هالسکه<sup>۱</sup> بسیار مهم‌تر بود. در سال ۱۸۷۳ آقای فریدریک فون هفner آلتنک<sup>۲</sup> سرمهندس این بنیاد القاگیر تازه‌ای طرح کرد که اقتباسی از القاگیر ماکویی یا القاگیر «T» شکل مگنتهای وی بود. او با استفاده از شکل طویل این هسته و بزرگتر کردن آن، به کمک پره‌های طولی که حول طبلیک مرکزی قرار داده بود سیم‌پیچ دستگاه را موازی با محور گذاشت. شش پره با فرجه ۶۰ درجه از یکدیگر، متناظر با دوازده بخش حلقه گرام بودند. مزیت این مکانیسم این بود که میدان مغناطیسی القاگر را در بخش بسیار بزرگتری از سیم‌پیچی القاگیر، جارو می‌کرد؛ درحالی که در سیم‌پیچ گرام تنها بخشهای خارجی حلقه فعال بودند (شکل ۳۰).

این راه‌حلی تجربی اما منطقی بود، القاگیر طبلیکی (استوانه‌ای)، ساخته شدن مولد قویتر، اما کوچکترین را ممکن ساخت. وانگهی چنین می‌نماید که همه این مزایا با تردید زیاد پذیرفته شدند؛ زیرا در سال ۱۸۷۳ در کارخانه زیمنس القاگیرهای حلقه‌ای مشابه القاگیرهای طبلیکی و نیز القاگیرهای صفحه‌ای بدون هسته مغناطیسی ساخته می‌شدند.

کمی بعد آقای ج. ف. براش<sup>۳</sup> از فیلادلفیا که بتازگی بروشنایی برق علاقه‌مند شده بود - گویا حدود سال ۱۸۷۸ نوعی لامپ قوسی ساخته بود که رواج فراوان یافت؛ همچنین وی شکل دیگری

1. Halske 2. F. von Hefner Alteneck

۳. Brush، چارلز فرانسیس (۱۸۴۹-۱۹۲۹)؛ دانشمند امریکایی.



شکل ۳۰. در بالا، اصول سیم‌پیچی القاگیر گرام به شکل حلقه؛ در پایین سیم‌پیچی هفتر به شکل بوبین.

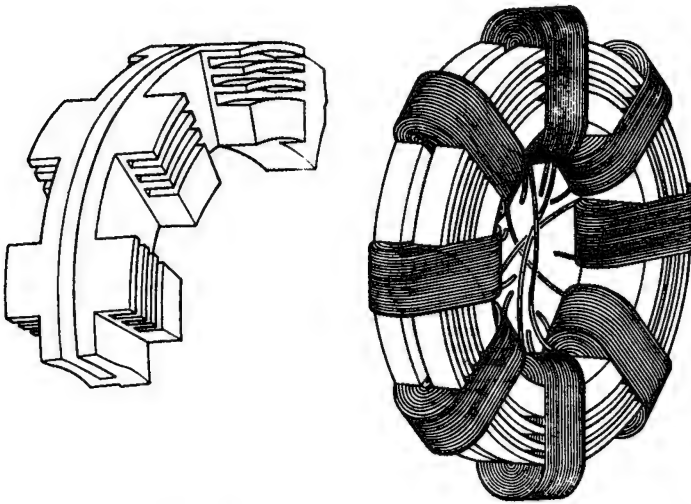
القاگیر برای دستگاهی طرح کرد که آقای دومونسل<sup>۱</sup> آن را «تنها یک نوع دستگاه پاجینوتی می‌داند که القاگیر آن به ترتیبی است که القاگرها از پهلوی هر حلقه اثر می‌گذارند. بدین ترتیب در تولید جریان القایی هر دو طرف آن به کار گرفته می‌شوند» (شکل ۳۱).

قرقره‌ها روی حلقه چدنی در تورفتگیهای آن پیچیده شده بودند. هشت قرقره دوه‌دو، هر یک با قرقره مقابل خود اتصال زنجیری داشت. سرهای هر جفت به دو تیغه جدا از هم یک کموتاتور متصل می‌شدند. ولتاژی که مولد تولید می‌کرد مربوط به دو بخش بود. القاگیری که بدین ترتیب تشکیل می‌شد عمودی بود و بین دو مغناطیس برقی القاگر می‌گردید. الکترودها طوری قرار گرفته بودند که قطبهای همنام آنها رویه‌روی یکدیگر باشند. تحریک اصلی را جریان خروجی تأمین می‌کرد اما بخشی از القاگر به‌طور موازی با کموتاتور متصل بود تا از گسستن کامل آهنربایی جلوگیری شده باشد.

دستگاه برآش را کمی پس از پیدایش، یک هیأت داوری امریکا تأیید کرد و هم در امریکا و هم در اروپا از آن استقبال فراوان به عمل آمد.

در دهه‌های ۱۸۷۰ و ۱۸۸۰ یافتن وسایل مستعد تولید بهترین نتایج از راه آزمایش، پیش افتادن از رقبا با ارائه چند ویژگی‌ای تازه جهت جلب مشتری و فرار از حقوق امتیازات پیشین انگیزه

1. Du Moncel



شکل ۳۱. نمایه سیم‌پیچی القاگیر برآش و جزئیات تورفتگیهای حلقه چدنی حامل آن.

سیلی از نظرات و ساختهای تازه شدند. تکنسین‌ها هنوز دارای یک ابزار علمی که بتواند کمک آنها در کارهایشان باشد نبودند.

تحول ترکیبات و ساختمان مولدها اساساً بر دو بخش: القاگیر با هسته مغناطیسی آن، قرقره‌ها، کلکتور و اصطکاکهای آن و از سوی دیگر القاگر (اشکال بسیار گوناگون مدارهای مغناطیسی و دستگاه قرقره‌ها) توجه داشت.

القاگیرها: در بخش القاگیرها احتمال می‌رود که آقای گرام از سیم‌پیچی آهنی روی یک میله محور به عنوان هسته مغناطیسی استفاده کرده باشد. زیرا راه حل بسیار ساده‌ای است. تعویض این میله محور با دسته‌ای از سیمهای آهنی، همان‌طور که دیده شد، امتیاز کاهش جریانهای مزاحم فوکو را داشت. اما بخش مستقیم هسته، بد کار گذاشته شده بود و فضای وسیعی خالی مانده بود.

آقای زیمنس با انتخاب استوانه‌ای توپر از آهن نرم برای القاگیر ماکویی خود، راه حل بدتری برگزید. آقای هفنز آلتنک برای القاگیرهای طبلمکی اولیه خود، تکنیک نخستین گرام را تکرار کرد. چندین لایه از سیم آهنی تابیده روی استوانه‌ای چوبی سیم‌پیچی شده بودند.

کمی بعد، حدود ۱۸۸۰ آقای وستون<sup>۱</sup> با روی هم چیدن ورقهای یک میلیمتری آهن که با رنگ یا زوروق عایق شده بودند هسته‌های متورقی را به کار گرفت. در همان ایام آقای ادیسن ورقهای

آهن را با پیچ و مهره‌های عمودی روی هم چید. این ورقها را بعداً با مجموعه‌ای از خارهای محکم شده روی محور حامل، عوض کرد.

با ایجاد سوراخهایی در ورقهای آهن، عبور هوا امکانپذیر شد و چاکهای پیرامون ورقها داده شد تا قرقره‌ها در آنها جای گیرند؛ بدین ترتیب، القاگیرهای با هسته صاف، که تا آن زمان رواج داشت، تغییر کرد.

بعداً، در پرتو پیشرفتهای تکنیکهای متالورژی توانستند از ضخامت ورقها بکاهند و آن را به  $\frac{1}{4}$  یا  $\frac{1}{5}$  میلیمتر برسانند - کاری که در اتلاف و گرم شدن تأثیر مطلوبی داشت. همچنین بعدها بررسی نفوذپذیری مغناطیسی به‌کاربرد فولادهای دارای اتلاف کم انجامید.

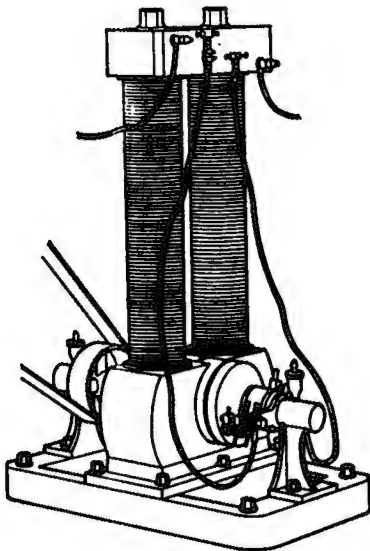
سیم‌پیچها را با سیمهای مسی استوانه‌ای، که نخست با پنبه دارای اندود لاک عایق می‌شدند می‌ساختند. بعداً کاغذ را به پنبه افزودند و در مواردی که دما زیاد بالا می‌رفت از نوارهای ساخته شده از پنبه نسوز استفاده کردند. مجموعه قرقره‌ها را حلقه می‌انداختند و لاک می‌زدند تا از شکل نیفتد.

در مورد دینامهای آبکاری یا الکترومتالورژی که در طی پانزده سال نخستین کاربرد برق صنعتی بسرعت گسترش یافته بودند از رساناهای ضخیم استفاده می‌شد. این رساناها از همان ابتدا، از کابل‌های با رشته‌های نازک، که به شکل مربع یا چهارگوش جمع شده بودند تشکیل می‌شد. حدود سال ۱۸۸۵ تهیه بخشهایی را از القاگیر به‌طور پیش‌ساخته بوسیله آقایان آیکمیر<sup>۱</sup> و رنه توری<sup>۲</sup> آغاز شد تا اینکه آنها را در چاکهای مربوطه جای دهند - چاکهایی که بعداً توسط کلافهای نخ بسته می‌شدند.

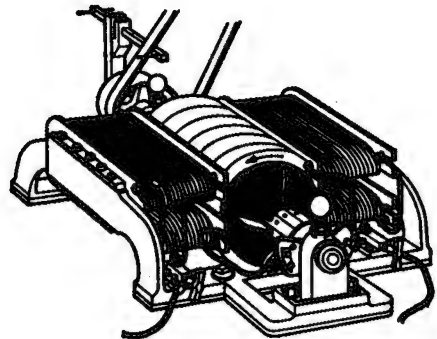
انواع کلکتور: آقای گرام کلکتورهای خود را از مس سخت می‌ساخت، اما برنج و حتی آهن هم برای این کار آزمایش شده‌اند. برای اینکه ورقهای فلزی را از یکدیگر، یا این ورقها را از بوش عایق سازند به‌جای مخلوطی از کاغذ و نخ میکا را به‌کار گرفتند. سطح بیرونی کلکتور می‌بایست کاملاً استوانه‌ای باشد. ورقها را پیش از تراشکاری، با دو حلقه دارای بدنه مخروطی و آستری از میکا، پرس می‌کردند.

اتصالات قرقره‌های القاگیر در کلکتور در آغاز پیچی بودند اما بعدها لحیمکاری شدند. کموتاتورهای گرام، جاروبک‌هایی واقعی از سیمهای برنجی قلع‌اندود بودند. بعدها ورقهای مسین که پیرامون آنها چاکهای طولی زده شده بود به‌کار گرفته می‌شد، سپس بافیه‌هایی از مس فشرده و سرانجام، حدود ۱۸۸۵، بوسیله فوربز، میله‌های زغالی به‌کار رفت.





شکل ۳۳. دینام ادیسن، نوع Z



شکل ۳۲. دینام زیمنس، نوع DO

القارگرا: القارگرا بسیار گوناگون بودند تا اینکه حدود ۱۸۸۶ بررسی مدارهای مغناطیسی، شکل منطقی آنها را به دست داد. در مولدهای اولیه گرام، هسته‌های توپر از آهن نرم، استوانه بودند و در وسط آنها آهنربایی کار گذاشته شده بود تا قطبهای مورد نظر در هسته‌ها پدید آیند. در مولدهای زیمنس این آهنرباها در دو قطب ممتد بودند اما مولدهای ادیسن حالت لفافی داشتند (شکلهای ۳۲ و ۳۳).

زمانی که سازندگان مولدها و استفاده‌کنندگان از آنها فراوان شدند، در سی سال ۱۸۸۰ - ۱۹۱۰ شاهد شکوفایی انواع مولدها هستیم که در فصل بعدی به اختصار از آنها یاد می‌کنیم. مبانی بررسیهای نظری: تنها چند سال پس از طرح دینام گرام و ساخت صنعتی انواع اولیه آن توسط کارخانه‌های مختلف کشورهای گوناگون، نظریه‌پردازان که در پیدایش این وسیله هیچ‌گونه سهمی نداشتند بررسی قضایای مربوط به آن را شروع کردند. این دخالت نظریه‌نیزیکی از مراحل تاریخی بسیار پراهمیت آغاز برق صنعتی است. گسترش بسیار سریع الکتروتکنیک پس از پشت سر گذاردن یک دهه کوتاه تجربه‌های کورکورانه، به‌طور اساسی با دو نیروی حدت ذهن نظریه‌پردازان و استادکاری سازندگان انجام گرفت.

در دورانی که ترمودینامیک هنوز نمی‌توانست برای تکنیک یار درخوری باشد و دستاوردهای

نخستین شیمی سنتز برپایه‌های استحکام یافته دانش قرار گرفته بودند، دینام نقطه آغازی شد که رشته تازه‌ای از دانش، تنها بقصد بیشترین استفاده از یک وسیله فنی موجود، از آن مایه گیرد. این حرکت در آن زمان تازه بود و چنانچه بخواهند تاریخ تکنیک را با توالی انقلابات کم و بیش بخوبی مشخص توضیح دهند برای شناسایی آغاز یک انقلاب دوم یا سوم صنعتی، این حرکت باید در نظر گرفته شود. جالب است بدانیم که هواداران این روش تفسیر تاریخی، از کنار آن گذشته‌اند.

در جریان همه این مراحل اولیه، ابعاد دینامها به تجربه تعیین شدند. یا می‌توان گفت که شم صنعتی، با در نظر گرفتن وسایل تولید موجود در آن روزگار، سازندگان را بدان ابعاد رهبری کرده است. در سال ۱۸۷۹ آقای لویی برگه تصمیم گرفت که ساخته‌های خود را برپایه‌های محکمتری قرار دهد.

در این زمان انتخاب‌کنندگان شکل القاگیر، بیشتر به عامل اقتصادی می‌اندیشیدند: حلقه گرام یا طبلک آلتنک کدام یک بصرفه نزدیکتر بودند. آقای برگه نشان می‌داد که این انتخاب بستگی بنوع و چگونگی استفاده از ماشینی دارد که قرار است ساخته شود و در این انتخاب باید مصرف هرچه کمتر مس را در نظر گرفت.

پس از آن آقای برگه که در مقام یک فیزیکدان، هم با تجربه و هم با کار صنعتی رابطه خود را گسسته بود در پی یافتن علت ایجاد فرجه بین کموتاتورها و خط خنثی نظری برای خفه کردن جرقه‌ها در کلکتور گرام برآمد. از دیرباز و در آن زمان نیز این اصلاح در کموتاتور کلارک انجام گرفته بود، بدون اینکه غم تفسیر آن را داشته باشند. آن را منسوب به اینرسی مغناطیسی ناشی از این واقعیت می‌دانستند که القا لحظه‌ای نیست.

آقای برگه به بررسی رفتار مغناطیسی دستگاهی که دو قطب مغناطیسی و یک حلقه واسطه داشت همت گماشت و بعد همان دستگاه را که با دو رسانای برق تکمیل شده بود اما ضمناً بخشهای فعال مارپیجهایی آقایان گرام و آلتنک را نیز واجد بود مورد مطالعه قرار داد. او درون حلقه و در طیف با خط نیرویی مواجه نشد. میدان مغناطیسی تنها روی بخشی بیرونی رساناها اثر می‌گذاشت. حداکثر تراکم خطهای نیرو در جهت عمود بر بخش مرکزی جریمهای قطبی دیده شد. آقای برگه جریانی را در رساناها که در زمان کار ماشین مانند یک موتور عمل می‌کردند، گذرانید و اعوجاج میدان برخاسته از ترکیب میدان القاگرها و میدانی که بوسیله به اصطلاح حلزون گالوانی ایجاد شده بود را رسم کرد. خط بی‌اثر به عقب میدان دوران جابه‌جا شده بود.

چنانچه ماشین به عنوان ژانراتور کار می‌کرد خط بی‌اثر به جلو میدان انتقال می‌یافت. باز برگه

آنچه را «واکنش القاگیر» می‌نامیدند معرفی کرد و معلوم ساخت که نتیجه فرجه حلقه‌های لغزان است.

اظهار نظرهای برگه ادامه دارد: میدانی که برخاسته از رساناهاست در حقیقت، نه زائیده قطعات ثابت، بلکه معلول قطعات متحرک است. این رساناها بدین ترتیب محل نوعی نیروی برق‌وارانی مقابل نیروی برق‌رانی آن منبع بیرونی است که القاگیر را تغذیه می‌کند. این میدان به هنگام کار ضعیف‌تر می‌شود. بنابراین هر قدر سرعت گردش موتور بیشتر شود فرجه خط بی‌اثر بزرگتر خواهد شد. چنانچه القاگرها را به‌طور زنجیری تحریک کنند، جابه‌جایی خط بی‌اثر، تنها در زمان اشباع القاگیر، محسوس می‌شود. کاستن از واکنش القاگیر کار مفیدی است و یکی از روشهای مورد نظر برای این کار افزایش مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) عرضی، مثلاً با ایجاد چاکهایی در جرمهای قطب‌دار است.

دانشمندان دیگر کارهای برگه را پی گرفتند. در سال ۱۸۷۹ آقای الوتر ماسکار<sup>۱</sup> فرانسوی نشان داد که نیروی برق‌رانی القاگیر در یک حلزون، تناسب مستقیم با سرعت تغییر شارهای دارد که از آن می‌گذرد. آقای جان هاپکینسون<sup>۲</sup> انگلیسی نمودارهایی را پیشنهاد کرد که نسبتهای موجود بین مقدارهای اساسی مؤثر در یک دینام و مدار بیرونی مورد تغذیه از آن نیروی برق‌رانی، و لذا در بسته‌ها، سرعت گردش، شدت جریان خروجی و بازده، روی آن نمودارها مستقیماً خوانده می‌شد. آقای مارسل دپره<sup>۳</sup> کاربرد نمودارهای هاپکینسون را گسترش داد و آنها را نمودارهای مشخصه (کاراکتریستیک) نامید. وی در جریان کارهای خود روی تئوری دینام، که در سال ۱۸۸۴ آغاز کرده بود، و پیش‌درآمدی برای کارهای وی درباره انتقال برق است - آن را عرضه داشت.

در این زمان نظریه پردازان دینام و مدارهای مغناطیسی فراوان شدند. در جنب آقای هنری ا. رولند<sup>۴</sup> که از سال ۱۸۷۳ به این قضیه دل بسته بود، بویژه باید از آقایان جان و ادوارد هاپکینسون نام برد که در جریان کارهایشان در سال ۱۸۷۹ که در ۱۸۸۴ و ۱۸۸۶ نیز بدان ادامه دادند به نتایج بسیار پراهمیت و کلی دست یافتند. برادران هاپکینسون فرمولهایی تنظیم کردند که به کمک آنها، مدار مغناطیسی محاسبه می‌شد. در شباهت با قانون اهم، شار مغناطیسی، خارج قسمت نیروی مغناطیس‌رانی بر مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) تعریف می‌شد. مقاومت مغناطیسی با تشابه با رساناهای برقی نوعی مقاومت مغناطیسی است که درون هسته‌ای از آهن نرم که تحت تأثیر یک میدان برقی قرار دارد پدید می‌آید. این شار تابعی از حاصلضرب تعداد پیچهای القاکننده بر شدت

1. E. Mascart 2. J. Hopkinson

۳. M. Deprez (۱۸۴۳ - ۱۹۱۸): فیزیکدان و الکتریسین فرانسوی.

۴. Henry A. Rowland (۱۸۴۸ - ۱۹۰۱): فیزیکدان آمریکایی.

جریانی است که از آن پیچها می‌گذرد، به عبارت دیگر همان آمپر- دور است و نسبت معکوس با ضریبی دارد که تابع طول هر بخش از مدار مغناطیسی، مقطع و نفوذپذیری آن است. این نوآوری مهم فرمولهای هاپکینسون محاسبه «مقدار نشت مغناطیس»، یعنی انشعابات زیان‌آور در یک مدار القاگر و یک مدار القاگیر را ممکن ساخت. با این فرمولها که تکمیل شده بودند می‌توانستند مقادیری را که تکنسین‌ها از راه تجربه برای بدنه دینام و موتور در نظر می‌گرفتند با دقت زیادی به دست آورند و منطقی‌ترین شکلها را، که به استوانه نزدیک می‌شد، با کفشکهای قطبی متناسب ارائه دهند.

### نمونه‌ای از روابط دانش و فن

بدین ترتیب، در کمتر از پانزده سال، تئوری پایه‌های استوار نخستین خود را گذاشت، اما نتوانست آن را در عمل پیاده کند زیرا تکنیک، در پرتو شم درست مردان کار و طبعاً با استفاده از سطح بالای وسایل مادی در دسترس، قبلاً توانسته بود مدل‌های گوناگونی از این ماشین بسازد. می‌توان پرسید چرا پیش از کار آقای گرام فیزیکدانان و ریاضیدانان به بررسی این ماشین علاقه‌مند نشده بودند. دانشمندان در واقع در ۶۰ سال پیش همه مطالب علمی مربوط به آن را در سطح بالایی «در اختیار» داشتند؛ این مطالب به کمک فرمولبندیهای ریاضی توضیح داده شده بود. اما این توضیحات همواره خصلت پژوهشهای نظری داشت؛ گرچه در «کاربردهایی» که احياناً متضمن سود عملی هم بودند می‌شد نظرات بسیار درستی از آنها استخراج کرد. چنین موردی تا آن زمان پیش نیامده بود و کاربردها از حد توان این ماشینهای الکترومغناطیسی، که حیطه عمل نسبتاً محدودی داشتند، فراتر نرفته بود.

می‌توان دقیقاً اندیشید که ماشینهای بزرگ الکترومغناطیس می‌توانستند موضوع یک چنین تحلیل عملی قرار گرفته باشند. حتمی است که پدیده‌های درونی این ماشینها به اندازه پدیده‌های درونی دینام پیچیده نبود؛ اما بی‌شبهه چند مفهوم بنیادی بیان شدند و این مفاهیم گویا زمانی که در دینام به محک تجربه درآمدند به طور اساسی مورد تجدید نظر قرار گرفتند. اما، مسأله این نیست که بدین پرسش پاسخ دهیم که آیا تئوری می‌توانست اختراع دینام را جلو بیندازد؟

تنها می‌توان به این واقعیت اشاره کرد که نظریه پردازان در عصری که ویژگی آن گسترش زیاد نظریه‌های الکترومغناطیسی فیزیک بود؛ به ماشینها توجهی نداشتند.

در واقع، در برابر ما نوعی فرآیند روابط دانش- فن قرار دارد که تا مدت‌ها پایدار خواهد بود و

از مشخصات کلی سده نوزدهم است. در مورد ماشین بخار هم با این وضع برخورد داشتیم و نیز در رشته ساختمانهای فلزی و بویژه پلهای بزرگ ساخته شده در این سده، و حتی در دوره پیدایش برق صنعتی و بالاخره در بخش موتورهای درونسوز همین نوع فرآیند در پیش روی ما است. در همه این موارد تکنسین‌ها راهی برای تکمیل کار خود در پیش گرفتند و دستگاههای روزبه‌روز مهمتری را بتدریج ساختند. نظریه‌پردازان در دنبال کردن تکنسین‌ها و ارائه تحلیلی علمی برای آفریده آنها به نفس نفس افتادند. آنها غالباً با مقداری تأخیر، خود را به تکنسین‌ها رسانیده‌اند، اما نتایج خاصی که به‌دست آورده‌اند از مرز دستاوردهای زمان چندان جلوتر نبوده است که بتواند برای پیشرفت کار تکنسین، ابزاری در اختیار وی بگذارد. این پیشروی همواره وجود داشته است اما تنها در سایه عمل و تجربه مثلاً بد نیست بدانیم که نظریه مقاومت مصالح، تا میانه سده نوزدهم، به‌کارگیری فراورده‌های آهنی بوسیله سازندگان را گام‌به‌گام دنبال کرده است. در مورد ترمودینامیک هم باید گفت که پیشرفت موتورهای حرارتی (با هوای گرم) با تأخیر زیاد از آن بهره‌مند شده است.

برق صنعتی نیز مراحل اولیه خود را با همین روال پشت‌سرگذاشته است. اما این فرآیند، تنها مدت کمی حاکم بود، حداکثر یک یا دو دهه. در پایان سالهای ۸۰ نظریه مربوط به دینام آن اندازه دقیق شد که احاطه تکنیک بوسیله نظریه به‌حد چشمگیری رسید یا اگر دقیقتر بگویم، بدان اندازه، که نوعی تکنولوژی برق، گرچه در سطح مبانی آن، شروع به شکل گرفتن کرد. خود نظریه دینام منطقاً از مدتها پیش توجه کارشناسان را به خود جلب کرده بود. مثلاً آقای پل ژانه<sup>۱</sup> توانست در سال ۱۹۳۰ بنویسد که مسأله جرقه‌های جاروبکها یکی از دشوارترین مسائل تکنولوژی برق است.

تناوبگر (آلترناتور)ها که بعداً از آنها سخن خواهیم گفت، بستر پدیده‌های آن چنان دشواری بودند که بدون دستاوردهای مهندسان روبه افزایش، با فکر قویاً ریاضی، دستگاههای ابتدایی آقایان گرام و لونت<sup>۲</sup>، از مرحله تغذیه شمع یا بلوچکوف، هرگز فراتر نمی‌رفتند. باز می‌توان از قول آقای ژانه گفت: «یکی از مهمترین (یا دشوارترین) و رایجترین مسأله روز (۱۹۳۰) همانا تحلیل حتی‌المقدور کامل تلفات انرژی در آن دستگاهها بود که عبارت بودند از: تلفاتی که می‌توان آنها را عادی خواند، مالش، تهویه، مانند مغناطیسی (هیستریزیس)، اثر ژول در رساناها و... یک بررسی عمیق، شمار بیشتری را آشکار خواهد کرد- تا بیست نوع از این تلفات شمارش شده است.»

انتقال برق و رفتار خطوط جریان در همان زمان توجه تکنسین‌های برق را از نو بدین حقیقت جلب کرد که بدون یاری نظریه نمی‌توان این دشواریها را پشت‌سر گذاشت.

## نتایج برگشت پذیری

اظهارات آقای ایپولیت فوتن در سال ۱۸۷۳ درباره برگشت پذیری دینام گرام موجب شد که الکتروموتور به کار گرفته شود. در واقع موتور دینامی با دستکاری جزئی مدل مولد ساخته می شد؛ اما برای اینکه الکتروموتور مورد استفاده قرار گیرد مدت ده سال انتظار لازم بود.

تردیدهایی درباره الکتروموتور: بی شبهه از سال ۱۸۷۳ می دانستند که شکل قرقره گذاری در حلقه و نیز تکنیک کلکتور، زمینه تازه ای از کاربرد خواهد یافت، اما در سالهای نخستین، این امر، نه یک کار جدی بلکه نوعی سرگرمی تلقی می شد.

دینام که بوسیله یک ماشین بخار یا موتور گازی کار می کرد پس از گذشت مدت کمی خود را با صرفه تر و مناسبتر از پیلهای باتری برای صنعت نشان داد. دینام، کار سیاه دستکاری اسیدها و مصرف پرهزینه روی را از میان برد. دینام بر اثر کار بسیار مطمئن، خود را همچون واسطه بسیار انعطاف پذیری میان انرژی مکانیکی و انرژی شیمیایی نشان داد که در آکومولاتورهای پلانته ذخیره می شد.

برتریهای الکتروموتور بی درنگ آشکار شد. این دستگاه می توانست با وصل دو سیم بدان تغذیه شود و در همان جا مقداری نیروی مکانیکی تولید کند. اما دو عیب بزرگ در آن وجود داشت: هزینه کار آن بسیار بیشتر از ماشین بخار یا موتور گازی بود در حالی که بازده انرژی آن ظاهراً از ۵۰٪ بالاتر نمی رفت. در سال ۱۸۵۵، حدود ۲۰ سال پیش از آنکه مسأله موتور صنعتی واقعی مطرح شود، بهای تمام شده یک ساعت کار یک الکتروموتور کوچک، از نوعی که در این زمان ساخته می شدند ۸/۵ فرانک برآورد شده است. منبع انرژی آن یک باتری از پیل به اصطلاح «سوزان» با دو کیلوگرم روی، با بهای هر کیلوگرم سهونیم فرانک بود. در حالی که در بهای تمام شده این پیل، استهلاك آن محاسبه نشده بود.

در سال ۱۸۸۱ در موتورهای جدید، قیمت تمام شده هر موتور به ۲/۳ کاهش یافت. در این محاسبه استهلاك به حساب آمده بود و برای ۳۰۰۰ ساعت کار در سال، بهای هر ساعت کار بیش از ۳/۵ فرانک نبود. در مقابل، بهای هر ساعت کار سایر انواع موتورها از قرار زیر بود:

ماشین بخار	برای توان بالاتر از ۲۰ اسب	۰/۱۳ فرانک
ماشین بخار	برای توان بالاتر از ۴ اسب	۰/۳۲ فرانک
موتور گازی	برای توان بالاتر از ۸ اسب	۰/۴۴ فرانک
موتور گازی	برای توان بالاتر از ۱ اسب	۰/۷۳ فرانک

از نظر مقایسه، بهای «موتور انسانی» برابر ۶/۲۵ فرانک در هر ساعت برای انجام دادن همان کارها بود.

بنابراین، گویا الکتروموتور محکوم بود به اینکه یک دستگاه آزمایشگاهی یا موتوری مناسب برای توانهای کم مناسب ساعت‌های برقی، چرخهای خیاطی، خطوط تلگراف، راه‌آهن باقی بماند. در نظر گرفته شده بود که کارگاهها مجهز به یک مرکز انتقال انرژی باشند که یک موتور آبی، ماشین بخار یا موتور گازی انرژی آن را تأمین کند. توزیع انرژی همیشه به کمک فلکه و تسمه برای هر ماشین انجام می‌گرفت. هنوز هیچ علاقه‌ای به تغییر شکل انرژی هیدرولیک یا انرژی گرمایی به الکتریسیته و عمل معکوس برای بازیابی انرژی مکانیکی دیده نمی‌شد. در این زمان هنوز روشن‌سازی، گالوانوپلاستی و تصفیه مس تنها کاربردهای مهم الکتریسیته باقی‌مانده بودند.

این مشکل بایستی در زمانهای دیگری مطرح می‌شد و استعداد فراوان کسانی مانند ایپولیت فونتن، مارسل دپره و ادیسن توانستند آن را حل کنند.

نخستین پیشنهاد مؤثر، توجه کردن به انرژی هیدرولیک به عنوان سرچشمه انرژی بود. کاربرد توربینهای گوناگون در سیستمهای مبتنی بر جریانهای آب، با همان تنوع آبشارها و شیبهای رودخانه‌ها در آن روزگار بسیار رایج بود. همچنین قرار دادن یک ژنراتور در تأسیسات هیدرولیکی و انتقال جریان برق آن به فواصل نزدیک بمنظور تغذیه موتورهای کار نسبتاً آسانی بود. این موتورها، ماشینهای گوناگون: ماشینهای ابزار، پرسهای چاپ، چرخهای خیاطی و اورگ‌ها را فعال می‌ساختند و در ضمن می‌توانستند حمام گالوانوپلاستی یا یک مدار روشن‌سازی را تغذیه کنند. حوادث برخاسته از «زیاد شدن جریان» که این کاربردها را محدود کنند، پیش نیامدند.

همچنین گویا عقیده داشتند که نباید بگذارند مولدهای کوچکی که با بخار می‌گردند و با نیاز محلی تناسب دقیقی دارند بسنده کنند بلکه بهتر این است که دینامهای پر قدرتی ساخته شوند تا دستگاههای متعددی را تغذیه کنند. اما پیش از تعمیم چنین سیستمی که بهای برق را کاهش می‌دهد، مسائل فراوانی باید حل شوند.

مسئله بازده الکتروموتورها: بحث بازده موتورهای مسئله بسیار ظریفی است. مفهومی که در ابتدا از آن داشتند برخاسته از نوعی تحلیل نارسای شرایط کار و تفسیری بیراه اما بسیار رایج بود که آن را قانون یاکوبی می‌نامیدند.

دیدیم که در ۱۸۳۸، آقای هرمان فون یاکوبی به مناسبت آزمایشهایش در حرکت دادن فایقی با موتور برقی اظهار داشت که شدت جریانی که از موتور می‌گذرد در فاصله لحظه‌ای که

قرقره‌های متحرک به باتری پیلها وصل می‌شود و زمانی که کار مکانیکی ایجاد شده توسط چرخ محرک به حد اکثر می‌رسد، به نسبت ۲ به ۱ کاهش می‌یابد. از این قانون چنین نتیجه گرفته شد که در اثر القای ایجاد شده به علت جابه‌جایی بوبینها در میدان الکترومغناطیسی ثابت، نوعی نیروی «برق‌وارانی» در بوبینها پدید می‌آید. این نیرو با نیروی پیلها مقابله می‌کند و شدت جریان را کاهش می‌دهد. توان در دسترس، تنها نیمی از توان باتری است و نیم دیگر آن تلف می‌شود.

فهم این نکته که چرا این قانون که شرایط توان بهینه را مشخص می‌سازد بوسیله برخی از معاصران به عنوان قانون مربوط به بازده تفسیر شده است، دشوار می‌نماید. این آقایان با مخلوط کردن توان با بازده، چنین نتیجه گرفتند که بازده هر موتور برقی نمی‌تواند از ۵۰٪ فراتر رود. چنانچه اتلاف نیروها را در اصطکاک، گرم شدن و جریانهای فوکو در نظر بگیریم مقدار بازده از این هم کمتر خواهد شد.

این اشتباه گویا در سال ۱۸۷۹ بوسیله آقای آخارت تصحیح شد. وی ثابت کرد که زمانی که توان یک الکتروموتور به سوی حداکثر گرایش دارد؛ بازده آن، به صفر میل می‌کند. در همان سال ایرتون برای بالا بردن بازده فراتر از ۵۰٪ روشی را بنیاد گذارد. تلفات تابع شدت جذب شده هستند، بنابراین، کافی است که با نگهداری مقدار توان، شدت را کاهش دهیم، این نتیجه‌گیری را می‌توان با انتخاب سرعت بسیار زیاد دوران به دست آورد زیرا این کار مقدار نیروی برق‌وارانی را افزایش می‌دهد و برای این کار لازم است تحریک القاگرها را به طور جدا از یکدیگر تنظیم کرد. توان برقی، برابر حاصلضرب شدت در نیروی برق‌وارانی است و چنانچه کاهش مقدار یکی از ضرایب با افزودن مقدار دیگری جبران شود به نتیجه خواهیم رسید. با در نظر گرفتن روابط گسترده ایرتون، آقای اوپتالیه<sup>۱</sup> می‌پرسد که «چه کسی می‌تواند ادعا کند که اولین نفر است؟»

تفوق جریان مستقیم: تا سال ۱۸۹۰ تنها با موتورهای جریان مستقیم آشنا بودند. در این دوره چندین عامل به سود جریان مستقیم بود: گشتاور راه‌اندازی قوی، بویژه چنانچه از تحریک زنجیری استفاده می‌شد؛ تغییر سرعت گردش با ایجاد فرجه جاروبکها روی کلکتور؛ معکوس کردن جهت دوران بوسیله کموناتور، گرچه روی یک خط جریان متناوب، امکان کار یک موتور کلکتوردار وجود داشت. این کاربرد بسیار محدود بود زیرا همین که توان به چهار تا پنج اسب می‌رسید جابه‌جاگری بسیار بد انجام می‌گرفت. چنانچه کلکتور حذف می‌شد دشواری دیگری پیش می‌آمد. یک موتور ساده جریان متناوب در لحظه راه‌اندازی باید با دست یا با یک موتور فرعی گردانیده می‌شد.



حدود سال ۱۸۹۰ بود که با کارهای گالیلئو فارادی، نیکلا تسلا<sup>۱</sup> و دالیوو-دابروولسکی<sup>۲</sup> با به کار گرفتن جریان چند فازی، این دشواریها برطرف شد. گرچه از همان زمان ساخت، موتورهای جریان متناوب، ساده تر و بنابراین با صرفه تر بودند موتورهای جریان مستقیم تا مدتها بعد، به کار گرفته می شدند.

در چند رشته کاری این موتور عملاً حریفی نداشت: کشیدن واگنهای راه آهن، تراموای و واگنهای کابلی، موتورهای بالابر (آسانسورهای ساختمانها و معادن). در واقع این موارد، نخستین کاربردهای موتورهای برقی بودند.

باز بدلیل دیگری، این بخش نمی توانست به سود همه جریانهای گوناگون باشد. این شبکه ها در مجموع، بخصوص برای توزیع جریان مستقیم مجهز شده بودند. باز باید گفت که در سال ۱۹۰۰ جریان مستقیم بسیار بیشتر از جریان متناوب هواخواه داشت: در فرانسه  $\frac{2}{3}$  و در پاریس  $\frac{3}{4}$ . اگر در آلمان برق سه فازی، که در این کشور آغاز شد، به سود جریان متناوب عمل کرد، در انگلستان وضع به گونه ای دیگر بود. در این کشور به علت نبودن سرچشمه های آبی، تنها از انرژی گرما استفاده می شد که در جنب خود محلهای مصرف تولید می شدند و بخصوص معادن از جریان مستقیم بهره می گرفتند. در امریکا، در ۱۹۰۱ در شهرهای بزرگ و پرجمعیت، شبکه های جریان مستقیم تفوق داشتند. جریان متناوب برای انتقال انرژی و توزیع آن در حومه شهرهای بزرگ و کوچک تولید می شد. در نیویورک در سال ۱۹۰۲ حدود ۳۰۰۰ آسانسور و بالابر موتوری با جریان مستقیم در برابر تنها ۳۰۰ وسیله موتوری با جریان متناوب فعال بودند.

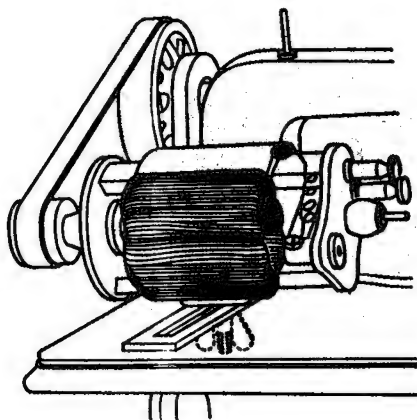
سرانجام باید تا ربع دوم سده بیستم به انتظار نشست تا موتورهای با جریان متناوب هماهنگ با جهشی در توسعه شبکه های توزیع، کاربردی عمومی یابند.

نخستین الکتروموتورها: دیده شد که آزمایشهای الکتروموتورها از مدتها پیش آغاز شد، اما در اواخر سالهای ۱۸۷۰ بود که تکمیل دینام گرام و زیمنس راه ساخت موتورهای واقعاً قابل استفاده را عملاً باز کرد. در سال ۱۸۷۳ گرام نوعی موتور دینامی چهار قطبی و چهار جاروبکی ساخت که الگوی آن دینام به اصطلاح هشت گوش خودش بود، اما به عللی که قابل درک است این موتور، کاربردی نیافت.

نخستین موتور با توان کم برای چرخهای خیاطی ساخته شد. در سال ۱۸۲۹ آقای مارسل دپره

۱. N. Tesla (۱۸۵۶-۱۹۴۳): فیزیکدان یوگوسلاو.

۲. Dolivo-Dobrowolsky، میخائیل اوسیپوویچ (۱۸۶۲-۱۹۱۹): دانشمند روسی الکترونیک؛ تولد ۱۸۶۲ و



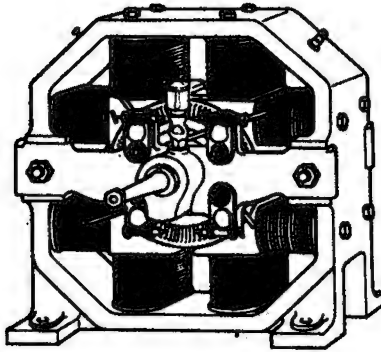
شکل ۳۴. موتور گریس کام (در یک چرخ خیاطی).

القاگیر کاملاً در القاگر، که تنها در شکل دیده می شود، گنجانیده شده است القاگیر دو T شکل زیمنس است. قطبهای القاگیر کمی خارج از مرکز و به طرف وسط قوز کرده اند.

موتورهای کوچکی ساخت که ۳۰۰۰ و ۵۴۰۰ دور در دقیقه می گردیدند. القاگر این ماشینها یک آهنربا دائمی بود که هشت تیغه داشت. بوبین القاگیر را یک باتری دارای هشت پیل بونزی تغذیه می کرد. دیده می شود که در آن زمان این وسیله بیشترین تحول را داشته است: کاربرد آهنرباهای دائم، نبودن شبکه توزیع، تولید برق با روش کاملاً کلاسیک با پیلهای شیمیایی. این تجهیزات در آن زمان صرفاً تجربی بودند.

دستگاههای دیگری از این قبیل ساخته شد، از قبیل موتور دیل<sup>۱</sup> در ۱۸۸۰؛ ماشین امریکایی گریس کام<sup>۲</sup>؛ انگلیسی ایرتون و پری در همان زمان. تنها موتور دیل دارای یک حلقه گرام بود. این موتور یک کلکتور شعاعی داشت تا کمتر فضاگیر باشد، القاگیر آن با جاروبکها می گردید. این مکانیسم بعدها در مقیاس بزرگی جهت ساخت یک مولد نیرومند به اصطلاح «بدون کلکتور» و چگالی زیاد به کار گرفته شد. بقیه موتورها با القاگیرهای ماکویی، تیرآهنی، زیمنس با چند تغییر در شکل آن ساخته شدند (شکل ۳۴).

در پایان باید از تحقیقات گوستاو ترووه<sup>۳</sup> از ۱۸۸۰ تا ۱۸۸۳ نام برد که دنباله کارهای پیشینیان وی بوده است. در موتورهای کوچک وی هیچ چیز تازه ای نبود، اما بد نیست توجه دهیم که آقای



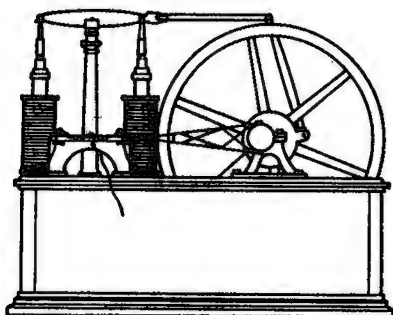
شکل ۳۵. موتور هشت‌گوش گرام.  
در صفحات دو قطر جابه‌جاگر چهار مغناطیس برقی و چهار جاروبک دیده می‌شوند.

ترووه در به‌کار گرفتن الکتروموتورهای برای حرکت دادن انواع خودروها، موتورسیکلت‌های سه‌چرخه، که وزن آکومولاتور آن بسیار زیاد بود، قایق و بالاخره بالون هدایت‌شونده پیشگام بوده است. ترووه در سال ۱۸۸۱ با یکی از موتورهای خود یکی از بالونهای هدایت‌شونده گاستون تیساندیه<sup>۱</sup> را از زیر طاق کاخ صنعت (پاله دو لندوستری) هدایت کرد. دو سال پس از آن با همان موتور یک پرواز آزمایشی انجام داد. این موتور ۱/۵ اسب توان داشت. اما مانع اصلی باز هم وزن آکومولاتور پلانتیه بود. آزمایشهای بعدی آقایان رنار و کربس<sup>۲</sup> با موتوری که دارای ۸/۵ اسب توان و مجهز به حلقه گرام بود به‌همین دلیل دنبال نشد.

موتورهای گرام: موتوری که مدت بیست سال برای توانهای بالا ساخته می‌شد، از آغاز دهه ۸۰، همانا موتور گرام دارای کلکتور بود. این نوع موتور را در آغاز، به مناسبت شکل بدنه آن، هشت‌گوش می‌نامیدند؛ چهار قطب و دو مدار مغناطیسی داشت (شکل ۳۵). در واقع این موتور هشت هسته قطبی داشت که هرکدام از آنها دارای قرقره‌های تحریک‌کننده خاص خود بودند که جفتی تنظیم شده بودند. آقای ادیسن چند سال بعد این مکانیسم را، که از قرقره‌های سنگین آسوده بود، برای مولدهای بزرگ نخستین خود که ۱۲۵ اسب توان داشتند، اقتباس کرد.

القاگیر این ماشینها به‌جای دو، چهار خط جاروبک داشت. و این، نوآوری مهمی بود که راه را برای ساخت ماشینهای چندقطبی هموار کرد.

۱. G. Tissandier (۱۸۴۳-۱۸۹۹): فضاورد فرانسوی.



شکل ۳۶. الکتروموتور بوربوز (Bourbouze) (۱۸۶۵)، با پیستونهای شناور در این الکتروموتور، تأثیر ساختمان ماشین بخار با سیلندره‌های عمودی، حتی به شکل شاهنگ دیده می‌شود.

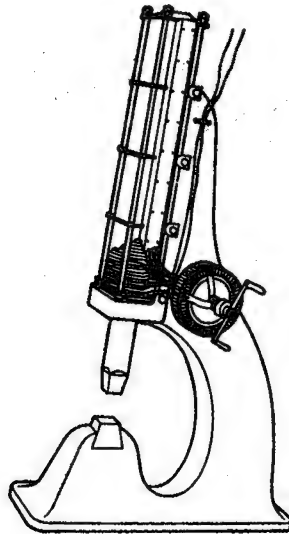
در سال ۱۸۷۹ چنین موتوری در کارخانه قندسازی سرمواز<sup>۱</sup> نزدیک ویتری لو فرانسوا<sup>۲</sup> کاربردهای گوناگونی یافت: کوبیدن دانه‌ها، وسیله پخت چغندر، کشیدن خیش تراکتور برای شخم به تاسی از نمونه آزمایشی چند سال پیش آنها با لوکوموبیل. این کارها با وسایل آن روزگار به نتیجه قطعی نرسیدند اما نوعی پیش آگهی استفاده از الکتروموتور بود که در دو دهه بعد پیشرفت کرد. موتورهای با حرکت خطی: جالب است بدانیم که موتورهای با حرکت خطی از همان سالهای نخست، ساخته و آزمایش شده بودند، درحالی که موتورهای دورانی، نظیر همه آنچه که تاکنون از آنها نام رفته است، چنین نبودند.

موتورهای دارای پیستون غوطه‌ور ساخت چارلز بیچ و بوربوز که رواج ناپایدار آنها را در گذشته دیده‌ایم حرکت خطی داشتند (شکل ۳۶). اما بهترین نمونه ساخته شده آنها، چکش هاونی الکترومغناطیسی آقای مارسل دپره بود که در حوالی سال ۱۸۸۰ چند نمونه از آن را ساخت (شکل ۳۷). این چکش، یک مغناطیس سنگین برقی با محور عمودی داشت که قسمتهای مطبق آن را مکانیسمی کمکی پیایی فعال می‌ساخت. بنابراین، هسته غوطه‌وری که حامل چکش بود می‌توانست تا ارتفاع زیادی، حدود دومتر، بالا برده شود. کلیدی در پایان حرکت، تحریک را قطع می‌کرد و جرم چکش با سقوط آزاد پایین می‌افتاد.

آقای زیمنس در ۱۸۷۹ متاعی برای معادن ساخت که حرکت رفت و برگشتی کلنگ آن بدون دخالت کموتاتور (جابه‌جاگر) بود و برای این کار روی قرقره دارای جریان مستقیم قرقره دیگری

1. Sermoize

۲. Vitry-le-François: ناحیه‌ای در ایالت مارن فرانسه، کنار رودخانه مارن.



شکل ۳۷. چکش هاونی الکترومغناطیسی مارسل دیره.

صد قرقره تخت با ضخامت یک سانتیمتر بر روی هم قرار دارند و به شکل قرقره های دینام با یکدیگر متصل شده اند. دو جاروبک که میل لنگی آنها را حرکت می دهد، مجتمعاً گروه ده عددی تیغه های کلکتور قرقره ها را می پوشانند. لبه های این ده تیغه، چکش ساخته شده از آهن نرم را، در استوانه بالا می برند. قطع جریان برق، سقوط سریع چکش را در پی دارد.

گذاشته شده بود که جریان متناوبی با بسامد کم آن را تغذیه می کرد. چندی نگذشت که از سیستم الکترومکانیکی برای فرمان دادن به علامتهای راه آهن استفاده شد. در سال ۱۸۹۱ آقای اشتروگر<sup>۱</sup> نخستین کموتاتور خودکار را برای تلفن ساخت، که در مجلد پنجم این مجموعه از آن یاد خواهیم کرد. نباید از یاد برد که فرمان الکتریکی آونگها و ساعتها را آقای نوله در سال ۱۸۵۱ ساخت. این فرمان با توان بسیار کمی فعال می شد و تحت تأثیر ساعت مرکزی زمان را نشان می داد. ساعت مرکزی با مکانیسمهای اختراعی در سالهای ۱۸۶۰ به توسط آقایان برگه، گارنیه<sup>۲</sup>، میلده<sup>۳</sup>، استانیسلاس فوریه و غیره، حرکات را به ساعتهای پیرو انتقال می داد.

## انتقال برق

پس از نخستین مرحله پیدایش برق صنعتی که سالهای ۶۰ و ۷۰ را دربر می‌گیرد می‌توان دید که مرحله دوم از آغاز سالهای ۸۰ تا حدود ۱۹۰۰ ادامه داشته است. از مشخصات این مرحله، آزمایشهای اولیه مربوط به انتقال نیرو و به‌کار گرفتن جریانهای چند فازی است.

تا آن زمان برای هر کار، مدارهای برقی میان مولدها و محلهای مصرف، بسیار کوتاه بودند و هنوز از تکنیکهای توزیع برق خبری نبود. مولدها نزدیک لگنهای گالوانوپلاستی و در خانه‌های مورد روشنایی کار می‌کردند و در آغاز برای هر چراغ یک مولد وجود داشت. بنابراین موتورهای برقی چندان مورد علاقه نبودند. با وجود بدیع بودن آن و آرزوها و امیدهایی که بیدار کرد، این تکنیک جدید الکتریک، گویا در همان مرحله تأسیسات فضاگیر و پرخرج و بیهوده، متوقف شد.

آزمایش نخست ایولیت فونتن در ۱۸۷۳ برای راه‌انداختن مولد گرام بوسیله یک موتور لنوار و انتقال برق آن به ماشین گرام دیگری بود که در نزدیکی آن قرار داشت. ماشین گرام اخیر در نقش موتور، برای به‌کار انداختن یک تلمبه کوچک مرکزگیز آب بود. خط رابط از دو سیم ۵۰۰ متری تشکیل می‌شد و توانی که انتقال یافته بود به نیم اسب هم نمی‌رسید.

گرچه این آزمایش، تکنسین‌ها و نیز توده مردم را شگفت‌زده کرد اما هیچ‌گونه پیگیری فوری و مهمی نداشت. اندیشه استفاده از انرژی هیدرولیک در شکل برقی و انتقال آن به محلهای دور مورد نظر، راه خود را به آهستگی تمام می‌پیمود. در سال ۱۸۷۵ آقای نیوده فیزیکدان چنین می‌نویسد: «فهم اینکه چرا مهندسان از این اندیشه، زیاد هیجان‌زده نشده‌اند دشوار است. منابع طبیعی مانند آبشارها و نیروی جزرومد را می‌توان به‌کار گرفت. سد پور-آ-لانگله<sup>۱</sup> روی رودخانه سن (در ایوری)<sup>۲</sup> هر روز ۳۰۰۰ اسب توان دارد و صنعت پاریس را می‌تواند تغذیه کند.»

اما در آن زمان از تکنیکهای انتقال فشارهای قوی به فواصل نسبتاً طولانی هیچ نمی‌دانستند. آنان که اطلاع و تجربه‌ای از مصالح نداشتند جز اینکه با روشهای آزمایشی برق را به فواصل کوتاهی انتقال دهند کاری نمی‌توانستند کرد. آقای مهندس کادیا از شرکت وال دوسن<sup>۳</sup> دو ماشین گرام را با فاصله ۱۵۰ متر به یکدیگر اتصال داد و با دو سیم به قطر سه میلیمتر ۵۰ کیلوگرم متر را منتقل کرد. در جریان یک شخم‌زنی آزمایشی با برق که در سرماز انجام گرفت آقای مهندس فلیکس در سال ۱۸۹۷ برق را ۵۰۰ متر انتقال داد. در همان سال آقایان ویلیام تامسن و کارل ویلیام زیمنس

1. Port-à-l'Anglais

۲. Ivry-Sur-Seine: محلی در ایالت کرتی، در فرانسه.

3. Val d' Osne

در مقابل پارلمنت انگلستان نشان دادند که چگونه خواهند توانست از انرژی آبشارهای نیاگارا برای استخراج معادن زغال سنگ بهره گیرند. اینان توانستند توانی برابر ۲۷ اسب را به کمک سیمی از مس با قطر ۱۲/۷ میلیمتر به مسافت ۵۰۰ کیلومتر انتقال دهند بشرطی که فشاری برابر ۸۰۰۰۰ ولت روی خط باشد.

این ولتاژ در سال ۱۸۹۷ از نظر تئوری عملی نبود اما بخوبی نشان می دهد که این اندیشه ها که پس از مدت کوتاهی بر دستاوردهای نظری تکیه می کردند و نیز پراتیکهای بسیار مشخص، در چه مسیری به پیش می رفتند. در ضمن توجه می دهیم که آبشار نیاگارا نخستین تجهیزات مولدهای توربینی خود را دقیقاً ۲۰ سال بعد دریافت داشت.

نخستین کارهای دپره: آقای مارسل دپره فیزیکدان فرانسوی بود که در سالهای ۱۸۸۱ - ۱۸۸۵ از سد انتقال برق به فواصل دور گذشت. در اوایل ۱۸۸۱ نظریه مربوط به انتقال «انرژی بوسیله برق» را طبق بیان خود تقریباً در کل آن فرمولبندی کرد. وی برپایه قوانین بنیادی که در پنجاه سال پیش کشف شده بودند جنبه های گوناگون مسأله را بررسی کرد و نشان داد که آنها، علی رغم منبع انرژی، جملگی به راه حل های مشابهی می رسند. یکی از نخستین این نتایج این بود که مرز مشهور بازده هر موتور در ۵۰٪ مرزی پایینتر است و این بازده را می توان بالا برد. وی همچنین شرایط نظری مربوط به تأمین توزیع جریان برق در نقاط مختلف مصرف، موتور یا لامپ روشنایی را تعیین کرد. این مسأله در آن روزگار، بسختی مورد گفت و گو بود. گفته می شد هرچند که نخستین راه حل از بوته آزمایش گذشته است، کاربرد یک ژنراتور برای هر واحد مصرف، نه رضایتبخش و نه اقتصادی بود. علاوه بر این، در کار مولد نقایص بزرگی هم وجود داشت. تغذیه زنجیری یا به اصطلاح آن زمان، ولتاژی، برای روشن سازی رایجترین سیستم مورد استفاده بود، اما باید تعبیه هایی به کار می رفت تا زمانی که لامپی را از مدار خارج می کنند همه مدار قطع نشود. تغذیه موازی برای تنظیم خروجی مولد برحسب نوع مصرف، دشواری بزرگی پدید می آورد. می توان گفت که مشخصه این دوره تا سال ۱۸۸۱ تشبث سازندگان عمده به انواع مهارتها تعبیه ها برای فرار از این دشواریها بود.

تنها کسی که توانست ریشه همه این دشواریها را بیابد و راه حل های نظری تعمیم پذیری برای آنها پیشنهاد کند آقای دپره بود. او در کارهای خود با همه روشهای تجربی تخمینی رایج آن زمان، قطع رابطه کرد، او خود پاره ای از این تخمینهای غیر علمی را ذکر می کند تا دقت محاسبات خود را نشان بدهد. یکی از دشواریهایی که همواره با هر بحث جدی مقابله می کرد، اثر زیانبخش فاصله بود. پس از آزمایشهای سرمواز، که در گذشته از آن یاد شد و آزمایشهای دیگری که در نوازیل (در

سن -۱- مارن) در شکلات‌سازی ژول منیه<sup>۱</sup> انجام گرفت این اندیشه پیش آمد که به قطر سیمها باید به تناسب فاصله افزوده شود. معلوم است که چه نوع استدلالی توانسته است به چنین نتایجی برسد.

بعضی ارقام شگفت‌انگیز، گاهی کاملاً من‌عندی، ذکر می‌شدند که سبب دلسردی همه تأسیسات مهم می‌شدند. مثلاً در امریکا محاسبه شده بود که «برای انتقال نیروی کار آبشار نیاگارا به محل‌های دور، مقدار مس مورد نیاز از ذخایر مس معادن دریاچه سوپریور بیشتر است». آقای دپره می‌افزاید: «بدین ترتیب من ظاهراً این افتخار را داشتم که حقیقتی را، که این‌همه بد فهمیده شده بود، ثابت کنم (که بازده خط ربطی به طول آن ندارد)». این حقیقت «با ناباوری بسیاری حتی از سوی الکتریسیته‌ها» برخورد شد.

وانگهی زمانی که این حقیقت پذیرفته شد محافل صلاحیتدار در خوش‌بینی افراط کردند. کارشناسان انگلیسی و امریکایی با محاسبه بدین نتیجه رسیدند که برای توزیع انرژی کامل همین آبشارهای نیاگارا در سراسر جهان، تنها کابل با قطر ۱۳ میلیمتر کفایت دارد. اما دپره بی‌درنگ حساب کرد که این انرژی که شاید بیش از دو میلیون اسب بخار باشد، با در نظر داشتن انواع مقاومت‌های احتمالی خطوط و دستگاهها، باید فشاری برابر یک‌ونیم میلیون ولت را تحمل کند تا در فاصله ۷۵ کیلومتری تنها ۵۰٪ بازده داشته باشد. در این دوران چنین ولتاژی سبب وحشت حتی خود دپره شد. حال که چنین است، چرا باید از سیم با قطر ۱۳ میلیمتری استفاده کرد و نه از سیم تلگرافی ۴ میلیمتری؟ وی نوشته است: «بالا بردن کم ولتاژ منبع، هزینه چندان‌ی ندارد و زمانی که با میلیونها ولت سروکار داریم تردیدی برای این هزینه کم خطاست.»

اگر اصراری باشد که بدانیم چرا آقای دپره تصمیم به حل مسئله انتقال برق گرفت باید بگوئیم که دخالت وی در این قضیه بمنظور برداشتن سدی بود که با آنچه که آقای گرام ده سال پیش فرصت حل آن را یافت شباهت بسیار داشت. وانگهی، در تاریخ صنعت وجود چنین موانعی فراوان دیده شده است. می‌توان آن را با کارهای وات برای ماشین بخار، استیونسن برای لوکوموتیو، و اتو برای موتورگازی و سرانجام آقای بل برای تلفن مشابه دانست. استمرار تحول صنعت، حتی در روزگار ما هم، تنها یک نمود است.

آقای دپره که فروتنی بیشتری از بعضی معاصران خود داشت، و جسورتر از برخی دیگر بود با محاسبه ثابت کرد که با دو ماشین گرام از نوع C «انتقال یک کار مفید ۱۰ اسب به فاصله ۵۰ کیلومتری بوسیله یک سیم معمولی تلگراف ممکن است، بشرط اینکه نیروی اولیه آن حدود ۱۶



اسب باشد.» بعدها وی پس از انجام آزمایشهای نخستین خود، نشان داد که با فشاری «معقول» انرژی برقی را می‌توان با بازده ۵۰٪ به فاصله ۳۵۰ کیلومتری انتقال داد؛ انرژی گرفته شده بوسیله خط بعدی را نیز می‌توان با همان بازده به همان فاصله منتقل ساخت. بنابراین، در فاصله ۷۰۰ کیلومتری، ۲۵٪ انرژی نخستین را خواهیم داشت: در اینجا تصریح می‌کنیم که این درصد، بازده همه تأسیسات انتقال برق است نه بازده یک موتور تنها. شهر پاریس هم می‌تواند از انرژی آبشارهای کوههای آلپ یا نیروی جریان رودخانه بزرگ راین تغذیه شود و هم از انرژی جریانهای کشندی اقیانوس.

آغاز تجربه‌ها: آغاز کارهای دیره در سال ۱۸۸۱ بدین علت بود که در این سال در پاریس یکی از نمایشگاههای متعدد برق این زمان جریان داشت. نوآوریها سریع بودند و هر یک از آنها توجه زیادی را به خود معطوف می‌داشت. این توجه هم از سوی توده مردم و هم بوسیله کارشناسان آشکار بود، وسایل نخستین که برای روشن‌سازی خانه با برق ساخته شدند با مشکلات تبعی انتقال و توزیع جریان برق روبه‌رو بودند. آقای دیره سیستمی برای توزیع پیشنهاد کرد که در برابر سیستمهای مورد نظر اشخاص متعدد دیگر، از جمله آقایان ادیسون و براش قرار داشت. در سیستم دیره، مولد به کمک سیستم ویژه‌ای از تحریک الکترومغناطیسی، خود را تنظیم می‌کرد. وی بدین ترتیب درستی نظرات خود را با عمل ثابت کرد و مدار گسترده‌ای را تغذیه کرد که در آن کارگاههای بسیاری با دستگاههای گوناگون با اتصال موازی فعال می‌شدند.

اما این نخستین نمایش برای متقاعد کردن اشخاص بدبین کافی نبود. این نمایش در آغاز سال بعد با تجربه‌ای که در کنسرواتوار پیشه و هنر روی یک خط ۸۰۰ اهمی هم‌ارز فاصله‌ای برابر ۸۰ کیلومتر صورت گرفت، کامل شد. برپاکندگان نمایشگاه برق در همان سال، ۱۸۸۲ در مونیخ به وی فرصت دادند تا آزمایش جالبتری را انجام دهد. یک صنعتگر باواریایی کارخانه خود را در میسباخ<sup>۱</sup> در اختیار وی گذاشت تا یک دینام گرام که توربینی هیدرولیکی آن را می‌گردانید در آنجا قرار دهد. در این آزمایش جریان برق می‌بایست حدود ۵۰ کیلومتر منتقل شود. این خط از یک سیم تلگراف تشکیل می‌شد و پایان آن، کاخ نمایشگاه بود. این خط یک موتور برقی را تغذیه می‌کرد که آن نیز بنوبه خود یک تلمبه هیدرولیک با توان تنها ربع اسب را به کار می‌انداخت. بازده این انتقال از ۳۹٪ کمی پایینتر بود. حوادث متعددی نزدیک بود این آزمایش را مختل کنند. اما آزمایش نشان می‌داد که این انرژی می‌تواند به شکل جریان برقی به فاصله‌ای که در آن روزگار چشمگیر می‌نمود انتقال یابد.

نمایشهای تعیین‌کننده: آقای دپره در سالهای بعد نتایج به‌دست آمده در مونیخ را با آزمایش تازه‌ای که در ماه فوریه در ایستگاه راه‌آهن شمالی انجام داد تأیید کرد. در این آزمایش مولد و موتور پهلوی یکدیگر گذاشته شده بودند اما دو تا از بسترهای اتصالی آنها را حلقه‌ای که از لو بورژ<sup>۱</sup> می‌گذشت به یکدیگر اتصال می‌داد کاری که مستلزم اتصال دو سیم به طول ۸/۵ کیلومتر است. دو بست اتصالی دیگر مستقیماً به هم متصل شده بودند.

آقای دپره به مشخصات مکانیکی این مولد توجه خاصی مبذول می‌داشت. به یاد آوریم که وی نخستین کسی بود که برای این دستگاهها نظریه‌ای ریاضی ارائه داشت. بدین ترتیب، وی عناصری را که برای محاسبه تولید نیروهای برقرانی زیاد لازم بود در اختیار داشت. وی ماشین خود را به حلقه گرام و دو کلکتور مجهز ساخت، و بنابراین، با اتصال زنجیری می‌توانست به ۲۷۰۰ ولت (۶۰ اسب توان) دست یابد. این موتور پنج اسب توان داشت. این نیرو در انتقال به‌هنگام آزمایش از ۲۵/۰ به ۴/۵ اسب و بازده انتقال از ۳۰ به ۴۸٪ تغییر کرد.

در پایان، دپره با انجام یک ردیف آزمایشهایی که در سال ۱۸۸۳ بین ویزی<sup>۲</sup> و گرنوبل و در سال ۱۸۸۵ بین پاریس و کری<sup>۳</sup> به‌عمل آورد به همه تردیدها درباره امکانات انتقال جریان برق پایان داد. آزمایش نخست تکرار آزمایش پیش اما در فاصله بیشتر، ۱۴ کیلومتر، بود و در نمایشگاه سال ۱۸۸۱ ارائه شد. این جریان که از یک کارخانه هیدرولیکی ویزی انتقال یافته بود، در گرنوبل نخست یک تلمبه کوچک، مانند مورد مونیخ، را به‌کار انداخت، سپس دو مولد را، که در همان‌جا الکتروموتورهایی را تغذیه می‌کردند که چند ماشین‌ابزار، دستگاه خراطی، اره مجمه (دیسکی)، پرس چاپ و بالاخره یک مدار روشن‌سازی با ۱۰۸ لامپ روشنایی ادیسن را به‌کار انداختند.

در آزمایشهای بین پاریس-لاشابل و کری، راه‌آهن شمالی فرانسه بخشی از هزینه آن را، و روچیلد بانکدار بخش دیگر آن را متقبل شده بود. این آزمایشها طبق برنامه دقیقی انجام یافتند که مثلاً انتقال جریان با ولتاژ ۶۰۰۰ در آنها پیش‌بینی شده بود. در این آزمایشها، مانند آزمایش گرنوبل به‌جای یک سیم معمولی تلگراف از سیمی استفاده شد که از مفرغ سیلیسیم‌دار بود. برای پرهیز از حوادثی نظیر آنچه که در تجربه نخستین مربوط به ایستگاه راه‌آهن شمالی اتفاق افتادند - جرقه‌زنی بسترهای اتصال با جرم (اتصال به زمین) در اثر بروز ولتاژ اضافی، که منجر به مرگ پل کورنو فیزیکدان شد - می‌بایست مسأله عایق‌سازی این بستها حل می‌شد. این آزمایشها روی هم‌رفته بیش

۱. Le Bourget: محلی در شهرستان سن-سن‌دنی واقع در شمال پاریس.

۲. Vizille: محلی در شهرستان ایزر، از ایالت گرنوبل.

۳. Creil: محلی در شهرستان اواز، کنار رودخانه اواز.

از یک سال ۱۸۸۵ - ۱۸۸۶ به درازا کشید تا دقت کار خط، مطمئن و تعهدات آقای دپره عمل شده باشد. اما پس از گذشت چهار سال کار نظری و آزمایشهای واقعی، هنوز دشواریهای گوناگونی وجود داشت که باید مرتفع می شدند، گرچه لاقلاً از نظر توده مردم و کارشناسان، وی موفق شده بود.

شرکت گرام بنوبه خود درخواست کرد که توانایی وی در این زمینه به ثبوت برسد، زیرا همه کارهای دپره با مولدهای طرح آن شرکت انجام گرفته بود. عملاً چهار دینام گرام که با اتصال زنجیری به یکدیگر مربوط می شدند و روی هم رفته ۵۹۰۰ ولت تولید می کردند در پایان خط، در فاصله ۵۷ کیلومتری، سه ماشین مشابه را که آنها هم با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند به عنوان موتور فعال می ساختند. بازده این انتقال ۵۰٪ بود، یعنی در همان حدودی که دپره به دست آورده بود.

با این حال، چنین می نماید که در بخش جریان مستقیم به مرزهای این تکنیک دست یافته بودند. یک کلکتور دینام نمی توانست ولتاژی بالاتر از ۳۰۰۰ ولت را تحمل کند. وانگهی مسئله عایق سازی بسترهای اتصالی دینامهای پایانی یک تسلسل زنجیری، در بالاتر از ۶۰۰۰ ولت لاینحل می نمود.

سیستم انتقال رنه توری: به دورانی رسیده بودند که ترانسفورماتورهای لوسین گولار<sup>۱</sup> و گیس بتازگی در کارآمده بودند و بنابراین، راه برای به کارگیری جریانهای متناوب باز شده بود و برای تولید ولتاژهای بالا با وسایل نسبتاً ساده امکاناتی به دست آمده بود.

با این همه، با اینکه کارهای اولیه در این زمینه را آقایان دالیو- دابروولسکی و براون (مهندسی از ژنو) انجام داده بودند، آقای توری توانست عصر انتقال جریان مستقیم را ادامه دهد.

در ماه مه ۱۸۹۰ شرکت صنایع برق ژنو در شهر ژنو مداری از توزیع برق مستقیم به طول ۴۸ کیلومتر با ۱۲۰۰۰ ولت فشار برای ۱۰۰ kW قدرت، مطابق سیستم توری برقرار کرد. همین شرکت تأسیسات دیگری از همین نوع در جاهای دیگر برپا ساخت و این تنها شرکتی بود که در زمانی که این تکنیک به سوی کاربرد جریانهای متناوب پیش می رفت، بدین کار دست زد. در همان سال مدار لا شو- دو- فون<sup>۲</sup> در سویس به طول ۵۶ کیلومتر و با فشار ۲۲۰۰۰ ولت برقرار شد.

در سال ۱۹۰۶ شاهد برقراری خطی به طول ۱۸۰ کیلومتر برای برق رسانی به شهر لیون می باشیم، خطی که بیش از سی سال فعال بود. مشخصات این خط دو بار تغییر کرد.

جریان این برق در کارخانه پلومبیر<sup>۲</sup> واقع در موتیه<sup>۱</sup> با کمک آبشاری از ایزر حدود ۶۵ متر که ۶۳۰۰ اسب ایجاد می‌کرد، تولید می‌شد؛ این خط زیر فشار ۵۷۶۰۰ ولت بود. مولدهای این خط با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند و ولتاژ آنها را با تغییر فرجه جاروبکها، تنظیم سرعت توربین یا تغییر تعداد مولدها، کم و زیاد می‌کردند. آقای توری در واقع با استفاده از اندیشه‌های گرام و کابانلا<sup>۲</sup> وسیله ثابت نگاهداشتن شدت جریان در ۷۵ آمپر و تغییر ولتاژ را ساخته بود. بر روی هم چهار توربین، شانزده دینام را فعال می‌ساختند.

جزئیات مهم و متعدد این تأسیسات با دقت تهیه شدند: عایق‌سازی زمین گروه ژنراتورها، کلیدهای ویژه‌ای که بوسیله آنها می‌توانستند در صورت تغییر جهت گردش توربین، جریان برق هر گروه و نیز هر دینام را قطع کنند (کوپلنگ تاشونده یک دینام برای کار موتوری آن می‌تواند خطرناک باشد)، امکان ایجاد اتصال به زمین میانه مدار قدرت و غیره.

خط هوایی به یک خط زیرزمینی به طول دو کیلومتر وصل می‌شد تا به مرکز شهر راه یابد. ولتاژ خط در ورود به شهر بوسیله کموتاتورهایی به ۶۰۰ ولت کاهش می‌یافت که ولتاژ متناسب توزیع در شبکه تراموهای لیون بود. یک پست فرعی در میانه خط ساخته شده بود که دارای سه کموتاتریس (تبدیلگر گردان) برای تبدیل جریان مستقیم به متناوب و تهیه جریان سه فازی برای شرکت نیرو و روشنایی گرنوبل بود. در موارد لزوم کار این کموتاتریس‌ها معکوس می‌شد و جریان سه فاز خط ثانوی به جریان مستقیم برای مصرف شهر لیون تبدیل می‌شد.

برتریهای این مجموعه در سادگی تأسیسات آن و فرمانهای مربوطه بود. نتایج آن چنان رضایتبخش بود که کاربرد آن نه تنها ادامه یافت بلکه حتی در دوره‌ای که مشکلات اولیه مربوط به انتقال جریان متناوب، سرعت و گسترده‌گی برطرف می‌شدند، رواج گرفت.

بین سالهای ۱۹۱۱ تا ۱۹۱۷ شدت جریان را دو برابر کردند و به ۱۵۰ آمپر، و فشار را به ۱۰۰۰۰۰ ولت رسانیدند. گروههای مولدهای جدیدی که در هر کلکتور ۴۰۰۰ ولت می‌دادند ساخته شدند. کارخانه‌های متعددی در طول مسیر این خط برپا شدند و برای اتصال خط با این کارخانه‌ها ابزارهای بدیعی اندیشیده شد. اصلاحات دیگر، بویژه کاربرد دینامهای ۷۵۰۰ ولتی، در سالها ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۹ انجام گرفت. در سال ۱۹۳۶ فشارکاری به ۱۲۵۰۰۰ ولت و مقدار مصرف برای شدت ثابت ۱۵۰ آمپر به ۱۸۰۰۰ kW رسید. تنها غم همسانی با دیگر شهرها بود که سبب شد لیون جریان مستقیم موتیه را، که جریان مستقیم مورد استفاده در فرانسه بود، رها سازد.

۱. Moutiers: محلی در ساووا، که در کوههای آلپ شمالی فرانسه، هم‌مرز با ایتالیا و سویس است.

حدود سال ۱۸۹۰ بود که با کارهای گالیلئو فراری، نیکلا تسلا<sup>۱</sup> و دالیوو-دابروولسکی<sup>۲</sup> با به کار گرفتن جریان چند فاز، این دشواریها برطرف شد. گرچه از همان زمان ساخت، موتورهای جریان متناوب، ساده تر و بنابراین با صرفه تر بودند موتورهای جریان مستقیم تا مدتها بعد، به کار گرفته می شدند.

در چند رشته کاری این موتور عملاً حریفی نداشت: کشیدن واگنهای راه آهن، تراموای و واگنهای کابلی، موتورهای بالابر (آسانسورهای ساختمانها و معادن). در واقع این موارد، نخستین کاربردهای موتورهای برقی بودند.

باز بدلیل دیگری، این بخش نمی توانست به سود همه جریانهای گوناگون باشد. این شبکه ها در مجموع، بخصوص برای توزیع جریان مستقیم مجهز شده بودند. باز باید گفت که در سال ۱۹۰۰ جریان مستقیم بسیار بیشتر از جریان متناوب هواخواه داشت: در فرانسه ۲/۳ و در پاریس ۳/۴. اگر در آلمان برق سه فاز، که در این کشور آغاز شد، به سود جریان متناوب عمل کرد، در انگلستان وضع به گونه ای دیگر بود. در این کشور به علت نبودن سرچشمه های آبی، تنها از انرژی گرما استفاده می شد که در جنب خود محلهای مصرف تولید می شدند و بخصوص معادن از جریان مستقیم بهره می گرفتند. در امریکا، در ۱۹۰۱ در شهرهای بزرگ و پرجمعیت، شبکه های جریان مستقیم تفوق داشتند. جریان متناوب برای انتقال انرژی و توزیع آن در حومه شهرهای بزرگ و کوچک تولید می شد. در نیویورک در سال ۱۹۰۲ حدود ۳۰۰۰ آسانسور و بالابر موتوری با جریان مستقیم در برابر تنها ۳۰۰ وسیله موتوری با جریان متناوب فعال بودند.

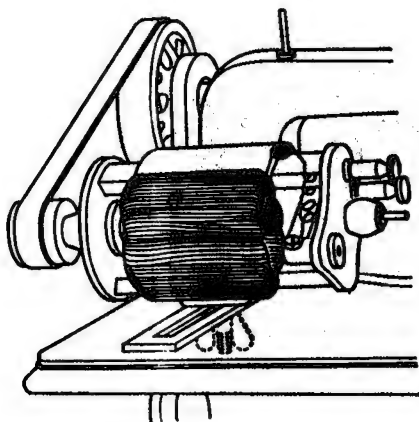
سرانجام باید تا ربع دوم سده بیستم به انتظار نشست تا موتورهای با جریان متناوب هماهنگ با جهشی در توسعه شبکه های توزیع، کاربردی عمومی یابند.

نخستین الکتروموتورها: دیده شد که آزمایشهای الکتروموتورها از مدتها پیش آغاز شد، اما در اواخر سالهای ۱۸۷۰ بود که تکمیل دینام گرم و زمینس راه ساخت موتورهای واقعاً قابل استفاده را عملاً باز کرد. در سال ۱۸۷۳ گرم نوعی موتور دینامی چهار قطبی و چهار جاروبکی ساخت که الگوی آن دینام به اصطلاح هشت گوش خودش بود، اما به عللی که قابل درک است این موتور، کاربردی نیافت.

نخستین موتور با توان کم برای چرخهای خیاطی ساخته شد. در سال ۱۸۲۹ آقای مارسل دپره

۱. N. Tesla (۱۸۵۶-۱۹۴۳): فیزیکدان یوگوسلاو.

۲. Dolivo-Dobrowolsky، میخایل اوسپوویچ (۱۸۶۲-۱۹۱۹): دانشمند روسی الکترونیک؛ تولد ۱۸۶۲ و



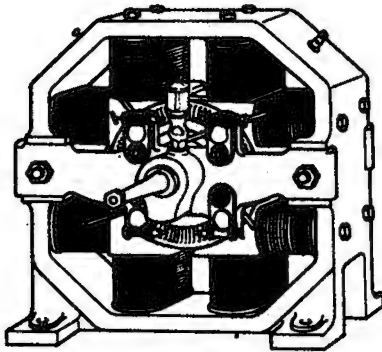
شکل ۳۴. موتور گریس کام (در یک چرخ خیاطی).

القاگیر کاملاً در القاگر، که تنها در شکل دیده می شود، گنجانیده شده است القاگیر دو T شکل زمینس است. قطبهای القاگیر کمی خارج از مرکز و به طرف وسط قوز کرده اند.

موتورهای کوچکی ساخت که ۳۰۰۰ و ۵۴۰۰ دور در دقیقه می گردیدند. القاگر این ماشینها یک آهنربا دائمی بود که هشت تیغه داشت. بوبین القاگیر را یک باتری دارای هشت پیل بوزنی تغذیه می کرد. دیده می شود که در آن زمان این وسیله بیشترین تحول را داشته است: کاربرد آهنرباهای دائم، نبودن شبکه توزیع، تولید برق با روش کاملاً کلاسیک با پیلهای شیمیایی. این تجهیزات در آن زمان صرفاً تجربی بودند.

دستگاههای دیگری از این قبیل ساخته شد، از قبیل موتور دیل<sup>۱</sup> در ۱۸۸۰؛ ماشین امریکایی گریس کام<sup>۲</sup>؛ انگلیسی ایرتون و پژی در همان زمان. تنها موتور دیل دارای یک حلقه گرام بود. این موتور یک کلکتور شعاعی داشت تا کمتر فضاگیر باشد، القاگیر آن با جاروبکها می گردید. این مکانیسم بعدها در مقیاس بزرگی جهت ساخت یک مولد نیرومند به اصطلاح «بدون کلکتور» و چگالی زیاد به کار گرفته شد. بقیه موتورهای با القاگیرهای ماکویی، تیرآهنی، زمینس با چند تغییر در شکل آن ساخته شدند (شکل ۳۴).

در پایان باید از تحقیقات گوستاو تروه<sup>۳</sup> از ۱۸۸۰ تا ۱۸۸۳ نام برد که دنباله کارهای پیشینیان وی بوده است. در موتورهای کوچک وی هیچ چیز تازه ای نبود، اما بد نیست توجه دهیم که آقای



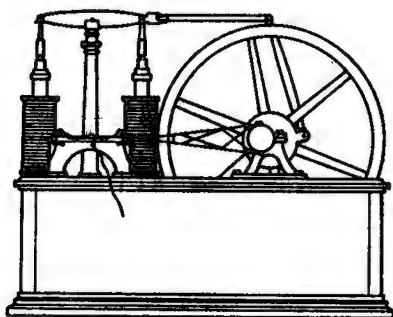
شکل ۳۵. موتور هشت گوش گرام.  
در صفحات دو قطر جابه‌جاگر چهار مغناطیس برقی و چهار جاروبک دیده می‌شوند.

ترووه در به‌کار گرفتن الکتروموتورهای برای حرکت دادن انواع خودروها، موتورسیکلت‌های سه‌چرخه‌ای، که وزن آکومولاتور آن بسیار زیاد بود، قایق و بالاخره بالون هدایت‌شونده پیشگام بوده است. ترووه در سال ۱۸۸۱ با یکی از موتورهای خود یکی از بالونهای هدایت‌شونده گاستون تیساندیه<sup>۱</sup> را از زیر طاق کاخ صنعت (پاله دو لندوستری) هدایت کرد. دو سال پس از آن با همان موتور یک پرواز آزمایشی انجام داد. این موتور ۱/۵ اسب توان داشت. اما مانع اصلی باز هم وزن آکومولاتور پلانته بود. آزمایشهای بعدی آقایان رنار و کربس<sup>۲</sup> با موتوری که دارای ۸/۵ اسب توان و مجهز به حلقه گرام بود به‌همین دلیل دنبال نشد.

موتورهای گرام: موتوری که مدت بیست سال برای توانهای بالا ساخته می‌شد، از آغاز دهه ۸۰، همانا موتور گرام دارای کلکتور بود. این نوع موتور را در آغاز، به مناسبت شکل بدنه آن، هشت‌گوش می‌نامیدند؛ چهار قطب و دو مدار مغناطیسی داشت (شکل ۳۵). در واقع این موتور هشت هسته قطبی داشت که هرکدام از آنها دارای قرقره‌های تحریک‌کننده خاص خود بودند که جفتی تنظیم شده بودند. آقای ادیسن چند سال بعد این مکانیسم را، که از قرقره‌های سنگین آسوده بود، برای مولدهای بزرگ نخستین خود که ۱۲۵ اسب توان داشتند، اقتباس کرد.

الفایر این ماشینها به‌جای دو، چهار خط جاروبک داشت و این، نوآوری مهمی بود که راه را برای ساخت ماشینهای چندقطبی هموار کرد.

۱. G. Tissandier (۱۸۴۳-۱۸۹۹): فضاورد فرانسوی.



شکل ۳۶. الکتروموتور بوربوز (Bourbouze) (۱۸۶۵)، با پیستونهای شناور در این الکتروموتور، تأثیر ساختمان ماشین بخار با سیلندره‌ای عمودی، حتی به شکل شاهنگ دیده می‌شود.

در سال ۱۸۷۹ چنین موتوری در کارخانه قندسازی سرمواز<sup>۱</sup> نزدیک ویتری لو فرانسوا<sup>۲</sup> کاربردهای گوناگونی یافت: کوبیدن دانه‌ها، وسیله پخت چغندر، کشیدن خیش تراکتور برای شخم به تاسی از نمونه آزمایشی چند سال پیش آنها با لوکوموبیل. این کارها با وسایل آن روزگار به نتیجه قطعی نرسیدند اما نوعی پیش آگهی استفاده از الکتروموتور بود که در دو دهه بعد پیشرفت کرد. موتورهای با حرکت خطی: جالب است بدانیم که موتورهای با حرکت خطی از همان سالهای نخست، ساخته و آزمایش شده بودند، درحالی‌که موتورهای دورانی، نظیر همه آنچه که تاکنون از آنها نام رفته است، چنین نبودند.

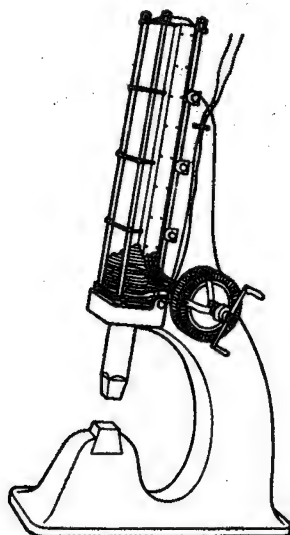
موتورهای دارای پیستون غوطه‌ور ساخت چارلز بیچ و بوربوز که رواج ناپایدار آنها را در گذشته دیده‌ایم حرکت خطی داشتند (شکل ۳۶). اما بهترین نمونه ساخته شده آنها، چکش هاونی الکترومغناطیسی آقای مارسل دپره بود که در حوالی سال ۱۸۸۰ چند نمونه از آن را ساخت (شکل ۳۷). این چکش، یک مغناطیس سنگین برقی با محور عمودی داشت که قسمتهای مطبق آن را مکانیسمی کمکی پیاپی فعال می‌ساخت. بنابراین، هسته غوطه‌وری که حامل چکش بود می‌توانست تا ارتفاع زیادی، حدود دومتر، بالا برده شود. کلیدی در پایان حرکت، تحریک را قطع می‌کرد و جرم چکش با سقوط آزاد پایین می‌افتاد.

آقای زیمنس در ۱۸۷۹ متعادل برای معادن ساخت که حرکت رفت و برگشتی کلنگ آن بدون دخالت کموتاتور (جابه‌جاگر) بود و برای این کار روی قرقره دارای جریان مستقیم قرقره دیگری

1. Sermoize

۲. Vitry-le-François: ناحیه‌ای در ایالت مارن فرانسه، کنار رودخانه مارن.





شکل ۳۷. چکش هاونی الکترومغناطیسی مارسل دپره.

صد قرقره تخت با ضخامت یک سانتیمتر بر روی هم قرار دارند و به شکل قرقره‌های دینام با یکدیگر متصل شده‌اند. دو جاروبک که میل لنگی آنها را حرکت می‌دهد، مجتمعاً گروه ده عددی تیغه‌های کلکتور قرقره‌ها را می‌پوشانند. لبه‌های این ده تیغه، چکش ساخته شده از آهن نرم را، در استوانه بالا می‌برند. قطع جریان برق، سقوط سریع چکش را در پی دارد.

گذاشته شده بود که جریان متناوبی با بسامد کم آن را تغذیه می‌کرد. چندی نگذشت که از سیستم الکترومکانیکی برای فرمان دادن به علامتهای راه‌آهن استفاده شد. در سال ۱۸۹۱ آقای اشتروگر<sup>۱</sup>. نخستین کموتاتور خودکار را برای تلفن ساخت، که در مجلد پنجم این مجموعه از آن یاد خواهیم کرد. نباید از یاد برد که فرمان الکتریکی آونگها و ساعتها را آقای نوله در سال ۱۸۵۱ ساخت. این فرمان با توان بسیار کمی فعال می‌شد و تحت تأثیر ساعت مرکزی زمان را نشان می‌داد. ساعت مرکزی با مکانیسمهای اختراعی در سالهای ۱۸۶۰ به توسط آقایان برگه، گارنیه<sup>۲</sup>، میلده<sup>۳</sup>، استانیسلاس فوریه و غیره، حرکات را به ساعتهای پیرو انتقال می‌داد.

## انتقال برق

پس از نخستین مرحله پیدایش برق صنعتی که سالهای ۶۰ و ۷۰ را دربر می‌گیرد می‌توان دید که مرحله دوم از آغاز سالهای ۸۰ تا حدود ۱۹۰۰ ادامه داشته است. از مشخصات این مرحله، آزمایشهای اولیه مربوط به انتقال نیرو و به‌کار گرفتن جریانهای چند فازی است.

تا آن زمان برای هر کار، مدارهای برقی میان مولدها و محل‌های مصرف، بسیار کوتاه بودند و هنوز از تکنیکهای توزیع برق خبری نبود. مولدها نزدیک لگنهای گالوانوپلاستی و در خانه‌های مورد روشنایی کار می‌کردند و در آغاز برای هر چراغ یک مولد وجود داشت. بنابراین موتورهای برقی چندان مورد علاقه نبودند. با وجود بدیع بودن آن و آرزوها و امیدهایی که بیدار کرد، این تکنیک جدید الکتریک، گویا در همان مرحله تأسیسات فضاگیر و پرخرج و بیهوده، متوقف شد.

آزمایش نخست ایپولیت فونتن در ۱۸۷۳ برای راه‌انداختن مولد گرام بوسیله یک موتور لنوار و انتقال برق آن به ماشین گرام دیگری بود که در نزدیکی آن قرار داشت. ماشین گرام اخیر در نقش موتور، برای به‌کار انداختن یک تلمبه کوچک مرکزگیز آب بود. خط رابط از دو سیم ۵۰۰ متری تشکیل می‌شد و توانی که انتقال یافته بود به نیم اسب هم نمی‌رسید.

گرچه این آزمایش، تکنسین‌ها و نیز توده مردم را شگفت‌زده کرد اما هیچ‌گونه پیگیری فوری و مهمی نداشت. اندیشه استفاده از انرژی هیدرولیک در شکل برقی و انتقال آن به محل‌های دور مورد نظر، راه خود را به آهستگی تمام می‌پیمود. در سال ۱۸۷۵ آقای نیوده فیزیکدان چنین می‌نویسد: «فهم اینکه چرا مهندسان از این اندیشه، زیاد هیجان‌زده نشده‌اند دشوار است. منابع طبیعی مانند آبشارها و نیروی جزرومد را می‌توان به‌کار گرفت. سد پور-آ-لانگله<sup>۱</sup> روی رودخانه سن (در ایوری)<sup>۲</sup> هر روز ۳۰۰۰ اسب توان دارد و صنعت پاریس را می‌تواند تغذیه کند.»

اما در آن زمان از تکنیکهای انتقال فشارهای قوی به فواصل نسبتاً طولانی هیچ نمی‌دانستند. آنان که اطلاع و تجربه‌ای از مصالح نداشتند جز اینکه با روشهای آزمایشی برق را به فواصل کوتاهی انتقال دهند کاری نمی‌توانستند کرد. آقای مهندس کادیا از شرکت وال دوسن<sup>۳</sup> دو ماشین گرام را با فاصله ۱۵۰ متر به یکدیگر اتصال داد و با دو سیم به قطر سه میلیمتر ۵۰ کیلوگرم متر را منتقل کرد. در جریان یک شخم‌زنی آزمایشی با برق که در سرمواز انجام گرفت آقای مهندس فلیکس در سال ۱۸۹۷ برق را ۵۰۰ متر انتقال داد. در همان سال آقایان ویلیام تامسن و کارل ویلیام زیمنس

1. Port-à-l'Anglais

۲. Ivry-Sur-Seine: محلی در ایالت کرتی، در فرانسه.

3. Val d' Osne

در مقابل پارلمنت انگلستان نشان دادند که چگونه خواهند توانست از انرژی آبشارهای نیاگارا برای استخراج معادن زغال سنگ بهره گیرند. اینان توانستند توانی برابر ۲۷ اسب را به کمک سیمی از مس با قطر ۱۲/۷ میلیمتر به مسافت ۵۰۰ کیلومتر انتقال دهند بشرطی که فشاری برابر ۸۰۰۰۰ ولت روی خط باشد.

این ولتاژ در سال ۱۸۹۷ از نظر تئوری عملی نبود اما بخوبی نشان می دهد که این اندیشه ها که پس از مدت کوتاهی بر دستاوردهای نظری تکیه می کردند و نیز پراتیکهای بسیار مشخص، در چه مسیری به پیش می رفتند. در ضمن توجه می دهیم که آبشار نیاگارا نخستین تجهیزات مولدهای توربینی خود را دقیقاً ۲۰ سال بعد دریافت داشت.

نخستین کارهای دپره: آقای مارسل دپره فیزیکدان فرانسوی بود که در سالهای ۱۸۸۱ - ۱۸۸۵ از سد انتقال برق به فواصل دور گذشت. در اوایل ۱۸۸۱ نظریه مربوط به انتقال «انرژی بوسیله برق» را طبق بیان خود تقریباً در کل آن فرمولبندی کرد. وی بر پایه قوانین بنیادی که در پنجاه سال پیش کشف شده بودند جنبه های گوناگون مسأله را بررسی کرد و نشان داد که آنها، علی رغم منبع انرژی، جملگی به راه حل های مشابهی می رسند. یکی از نخستین این نتایج این بود که مرز مشهور بازده هر موتور در ۵۰٪ مرزی پایینتر است و این بازده را می توان بالا برد. وی همچنین شرایط نظری مربوط به تأمین توزیع جریان برق در نقاط مختلف مصرف، موتور یا لامپ روشنایی را تعیین کرد. این مسأله در آن روزگار، بسختی مورد گفت و گو بود. گفته می شد هر چند که نخستین راه حل از بوته آزمایش گذشته است، کاربرد یک ژنراتور برای هر واحد مصرف، نه رضایتبخش و نه اقتصادی بود. علاوه بر این، در کار مولد نقایص بزرگی هم وجود داشت. تغذیه زنجیری یا به اصطلاح آن زمان، ولتاژی، برای روشن سازی رایجترین سیستم مورد استفاده بود، اما باید تعبیه هایی به کار می رفت تا زمانی که لامپی را از مدار خارج می کنند همه مدار قطع نشود. تغذیه موازی برای تنظیم خروجی مولد بر حسب نوع مصرف، دشواری بزرگی پدید می آورد. می توان گفت که مشخصه این دوره تا سال ۱۸۸۱ تثبیت سازندگان عمده به انواع مهارتها تعبیه ها برای فرار از این دشواریها بود.

تنها کسی که توانست ریشه همه این دشواریها را بیابد و راه حل های نظری تعمیم پذیری برای آنها پیشنهاد کند آقای دپره بود. او در کارهای خود با همه روشهای تجربی تخمینی رایج آن زمان، قطع رابطه کرد، او خود پاره ای از این تخمینهای غیر علمی را ذکر می کند تا دقت محاسبات خود را نشان بدهد. یکی از دشواریهایی که همواره با هر بحث جدی مقابله می کرد، اثر زیانبخش فاصله بود. پس از آزمایشهای سرمواز، که در گذشته از آن یاد شد و آزمایشهای دیگری که در نوازیل (در

سن -۱- مارن) در شکلات‌سازی ژول منیه<sup>۱</sup> انجام گرفت این اندیشه پیش آمد که به قطر سیمها باید به تناسب فاصله افزوده شود. معلوم است که چه نوع استدلالی توانسته است به چنین نتایجی برسد.

بعضی ارقام شگفت‌انگیز، گاهی کاملاً من‌عندی، ذکر می‌شدند که سبب دلسردی همه تأسیسات مهم می‌شدند. مثلاً در امریکا محاسبه شده بود که «برای انتقال نیروی کار آبشار نیاگارا به محل‌های دور، مقدار مس مورد نیاز از ذخایر مس معادن دریاچه سوپریور بیشتر است». آقای دپره می‌افزاید: «بدین‌ترتیب من ظاهراً این افتخار را داشتم که حقیقتی را، که این‌همه بد فهمیده شده بود، ثابت کنم (که بازده خط ربطی به طول آن ندارد)». این حقیقت «با ناباوری بسیاری حتی از سوی الکتریسیته‌ها» برخورد شد.

وانگهی زمانی که این حقیقت پذیرفته شد محافل صلاحیت‌دار در خوش‌بینی افراط کردند. کارشناسان انگلیسی و امریکایی با محاسبه بدین نتیجه رسیدند که برای توزیع انرژی کامل همین آبشارهای نیاگارا در سراسر جهان، تنها کابل با قطر ۱۳ میلیمتر کفایت دارد. اما دپره بی‌درنگ حساب کرد که این انرژی که شاید بیش از دو میلیون اسب بخار باشد، با در نظر داشتن انواع مقاومتهای احتمالی خطوط و دستگاهها، باید فشاری برابر یک‌ونیم میلیون ولت را تحمل کند تا در فاصله ۷۵ کیلومتری تنها ۵۰٪ بازده داشته باشد. در این دوران چنین ولتاژی سبب وحشت حتی خود دپره شد. حال که چنین است، چرا باید از سیم با قطر ۱۳ میلیمتری استفاده کرد و نه از سیم تلگرافی ۴ میلیمتری؟ وی نوشته است: «بالا بردن کم ولتاژ منبع، هزینه چندانانی ندارد و زمانی که با میلیونها ولت سروکار داریم تردیدی برای این هزینه کم خطاست.»

اگر اصراری باشد که بدانیم چرا آقای دپره تصمیم به حل مسئله انتقال برق گرفت باید بگوییم که دخالت وی در این قضیه بمنظور برداشتن سدی بود که با آنچه که آقای گرام ده سال پیش فرصت حل آن را یافت شباهت بسیار داشت. وانگهی، در تاریخ صنعت وجود چنین موانعی فراوان دیده شده است. می‌توان آن را با کارهای وات برای ماشین بخار، استیونسن برای لوکوموتیو، و اتو برای موتور گازی و سرانجام آقای بل برای تلفن مشابه دانست. استمرار تحول صنعت، حتی در روزگار ما هم، تنها یک نمود است.

آقای دپره که فروتنی بیشتری از بعضی معاصران خود داشت، و جسورتر از برخی دیگر بود با محاسبه ثابت کرد که با دو ماشین گرام از نوع C «انتقال یک کار مفید ۱۰ اسب به فاصله ۵۰ کیلومتری بوسیله یک سیم معمولی تلگراف ممکن است، بشرط اینکه نیروی اولیه آن حدود ۱۶

اسب باشد.» بعدها وی پس از انجام آزمایشهای نخستین خود، نشان داد که با فشاری «معقول» انرژی برقی را می‌توان با بازده ۵۰٪ به فاصله ۳۵۰ کیلومتری انتقال داد؛ انرژی گرفته شده بوسیله خط بعدی را نیز می‌توان با همان بازده به همان فاصله منتقل ساخت. بنابراین، در فاصله ۷۰۰ کیلومتری، ۲۵٪ انرژی نخستین را خواهیم داشت؛ در اینجا تصریح می‌کنیم که این درصد، بازده همه تأسیسات انتقال برق است نه بازده یک موتور تنها. شهر پاریس هم می‌تواند از انرژی آبشارهای کوههای آلپ یا نیروی جریان رودخانه بزرگ راین تغذیه شود و هم از انرژی جریانهای کشندی اقیانوس.

آغاز تجربه‌ها: آغاز کارهای دیره در سال ۱۸۸۱ بدین علت بود که در این سال در پاریس یکی از نمایشگاههای متعدد برق این زمان جریان داشت. نوآورها سریع بودند و هر یک از آنها توجه زیادی را به خود معطوف می‌داشت. این توجه هم از سوی توده مردم و هم بوسیله کارشناسان آشکار بود، وسایل نخستین که برای روشن‌سازی خانه با برق ساخته شدند با مشکلات تبعی انتقال و توزیع جریان برق روبه‌رو بودند. آقای دیره سیستمی برای توزیع پیشنهاد کرد که در برابر سیستمهای مورد نظر اشخاص متعدد دیگر، از جمله آقایان ادیسن و براش قرار داشت. در سیستم دیره، مولد به کمک سیستم ویژه‌ای از تحریک الکترومغناطیسی، خود را تنظیم می‌کرد. وی بدین ترتیب درستی نظرات خود را با عمل ثابت کرد و مدار گسترده‌ای را تغذیه کرد که در آن کارگاههای بسیاری با دستگاههای گوناگون با اتصال موازی فعال می‌شدند.

اما این نخستین نمایش برای متقاعد کردن اشخاص بدین کافی نبود. این نمایش در آغاز سال بعد با تجربه‌ای که در کنسرواتوار پیشه و هنر روی یک خط ۸۰۰ اهمی هم‌ارز فاصله‌ای برابر ۸۰ کیلومتر صورت گرفت، کامل شد برپاکنندگان نمایشگاه برق در همان سال، ۱۸۸۲ در مونیخ به وی فرصت دادند تا آزمایش جالبری را انجام دهد. یک صنعتگر باواریایی کارخانه خود را در میسباخ<sup>۱</sup> در اختیار وی گذاشت تا یک دینام گرام که توربینی هیدرولیکی آن را می‌گردانید در آنجا قرار دهد. در این آزمایش جریان برق می‌بایست حدود ۵۰ کیلومتر منتقل شود. این خط از یک سیم تلگراف تشکیل می‌شد و پایان آن، کاخ نمایشگاه بود. این خط یک موتور برقی را تغذیه می‌کرد که آن نیز بنوبه خود یک تلمبه هیدرولیک با توان تنها ربع اسب را به کار می‌انداخت. بازده این انتقال از ۳۹٪ کمی پایینتر بود. حوادث متعددی نزدیک بود این آزمایش را مختل کنند. اما آزمایش نشان می‌داد که این انرژی می‌تواند به شکل جریان برقی به فاصله‌ای که در آن روزگار چشمگیر می‌نمود انتقال یابد.

نمایشهای تعیین کننده: آقای دپره در سالهای بعد نتایج به دست آمده در مونیخ را با آزمایش تازه ای که در ماه فوریه در ایستگاه راه آهن شمالی انجام داد تأیید کرد. در این آزمایش مولد و موتور پهلوی یکدیگر گذاشته شده بودند اما دو تا از بسترهای اتصالی آنها را حلقه ای که از لو بورژه<sup>۱</sup> می گذشت به یکدیگر اتصال می داد کاری که مستلزم اتصال دو سیم به طول ۸/۵ کیلومتر است. دو بست اتصالی دیگر مستقیماً به هم متصل شده بودند.

آقای دپره به مشخصات مکانیکی این مولد توجه خاصی مبذول می داشت. به یاد آوریم که وی نخستین کسی بود که برای این دستگاهها نظریه ای ریاضی ارائه داشت. بدین ترتیب، وی عناصری را که برای محاسبه تولید نیروهای برقرانی زیاد لازم بود در اختیار داشت. وی ماشین خود را به حلقه گرام و دو کلکتور مجهز ساخت، و بنابراین، با اتصال زنجیری می توانست به ۲۷۰۰ ولت (۶۰ اسب توان) دست یابد. این موتور پنج اسب توان داشت. این نیرو در انتقال به هنگام آزمایش از ۲۵/۰ به ۴/۵ اسب و بازده انتقال از ۳۰ به ۴۸٪ تغییر کرد.

در پایان، دپره با انجام یک ردیف آزمایشهایی که در سال ۱۸۸۳ بین ویزی<sup>۲</sup> و گرنوبل و در سال ۱۸۸۵ بین پاریس و کری<sup>۳</sup> به عمل آورد به همه تردیدها درباره امکانات انتقال جریان برق پایان داد. آزمایش نخست تکرار آزمایش پیش اما در فاصله بیشتر، ۱۴ کیلومتر، بود و در نمایشگاه سال ۱۸۸۱ ارائه شد. این جریان که از یک کارخانه هیدرولیکی ویزی انتقال یافته بود، در گرنوبل نخست یک تلمبه کوچک، مانند مورد مونیخ، را به کار انداخت، سپس دو مولد را، که در همان جا الکتروموتورهایی را تغذیه می کردند که چند ماشین ابزار، دستگاه خراطی، اره مجموعه (دیسکی)، پرس چاپ و بالاخره یک مدار روشن سازی با ۱۰۸ لامپ روشنایی ادیسن را به کار انداختند.

در آزمایشهای بین پاریس-لاشایل و کری، راه آهن شمالی فرانسه بخشی از هزینه آن را، و روجیلد بانکدار بخش دیگر آن را متقبل شده بود. این آزمایشها طبق برنامه دقیقی انجام یافتند که مثلاً انتقال جریان با ولتاژ ۶۰۰۰ در آنها پیش بینی شده بود. در این آزمایشها، مانند آزمایش گرنوبل به جای یک سیم معمولی تلگراف از سیمی استفاده شد که از مفرغ سیلیسیم دار بود. برای پرهیز از حوادثی نظیر آنچه که در تجربه نخستین مربوط به ایستگاه راه آهن شمالی اتفاق افتادند - جرقه زنی بسترهای اتصال با جرم (اتصال به زمین) در اثر بروز ولتاژ اضافی، که منجر به مرگ پل کورنو فیزیکدان شد - می بایست مسئله عایق سازی این بستها حل می شد. این آزمایشها روی هم رفته بیش

۱. Le Bourget: محلی در شهرستان سن-دنن واقع در شمال پاریس.

۲. Vizille: محلی در شهرستان ایزر، از ایالت گرنوبل.

۳. Creil: محلی در شهرستان اواز، کنار رودخانه اواز.

از یک سال ۱۸۸۵ - ۱۸۸۶ به درازا کشید تا دقت کار خط، مطمئن و تعهدات آقای دیره عمل شده باشد. اما پس از گذشت چهار سال کار نظری و آزمایشهای واقعی، هنوز دشواریهای گوناگونی وجود داشت که باید مرتفع می شدند، گرچه لاقلاً از نظر توده مردم و کارشناسان، وی موفق شده بود.

شرکت گرام بنوبه خود درخواست کرد که توانایی وی در این زمینه به ثبوت برسد، زیرا همه کارهای دیره با مولدهای طرح آن شرکت انجام گرفته بود. عملاً چهار دینام گرام که با اتصال زنجیری به یکدیگر مربوط می شدند و روی هم رفته ۵۹۰۰ ولت تولید می کردند در پایان خط، در فاصله ۵۷ کیلومتری، سه ماشین مشابه را که آنها هم با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند به عنوان موتور فعال می ساختند. بازده این انتقال ۵۰٪ بود، یعنی در همان حدودی که دیره به دست آورده بود.

با این حال، چنین می نماید که در بخش جریان مستقیم به مرزهای این تکنیک دست یافته بودند. یک کلکتور دینام نمی توانست ولتاژی بالاتر از ۳۰۰۰ ولت را تحمل کند. وانگهی مسئله عایق سازی بسترهای اتصالی دینامهای پایانی یک تسلسل زنجیری، در بالاتر از ۶۰۰۰ ولت لاینحل می نمود.

سیستم انتقال رنه توری: به دورانی رسیده بودند که ترانسفورماتورهای لوسین گولار<sup>۱</sup> و گبیس بتازگی در کار آمده بودند و بنابراین، راه برای به کارگیری جریانهای متناوب باز شده بود و برای تولید ولتاژهای بالا با وسایل نسبتاً ساده امکاناتی به دست آمده بود.

با این همه، با اینکه کارهای اولیه در این زمینه را آقایان دالیو- دابروولسکی و براون (مهندسی از ژنو) انجام داده بودند، آقای توری توانست عصر انتقال جریان مستقیم را ادامه دهد.

در ماه مه ۱۸۹۰ شرکت صنایع برق ژنو در شهر ژنو مدارى از توزیع برق مستقیم به طول ۴۸ کیلومتر با ۱۲۰۰۰ ولت فشار برای ۱۰۰ kW قدرت، مطابق سیستم توری برقرار کرد. همین شرکت تأسیسات دیگری از همین نوع در جاهای دیگر برپا ساخت و این تنها شرکتی بود که در زمانی که این تکنیک به سوی کاربرد جریانهای متناوب پیش می رفت، بدین کار دست زد. در همان سال مدار لا شو- دو- فون<sup>۲</sup> در سویس به طول ۵۶ کیلومتر و با فشار ۲۲۰۰۰ ولت برقرار شد.

در سال ۱۹۰۶ شاهد برقراری خطی به طول ۱۸۰ کیلومتر برای برق رسانی به شهر لیون می باشیم، خطی که بیش از سی سال فعال بود. مشخصات این خط دو بار تغییر کرد.

جریان این برق در کارخانه پلومیر<sup>۳</sup> واقع در موتیه<sup>۱</sup> با کمک آبنشاری از ایزر حدود ۶۵ متر که ۶۳۰۰ اسب ایجاد می‌کرد، تولید می‌شد؛ این خط زیر فشار ۵۷۶۰۰ ولت بود. مولدهای این خط با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند و ولتاژ آنها را با تغییر فرجه جاروبکها، تنظیم سرعت توربین یا تغییر تعداد مولدها، کم و زیاد می‌کردند. آقای توری در واقع با استفاده از اندیشه‌های گرام و کابانلا<sup>۲</sup> وسیله ثابت نگاهداشتن شدت جریان در ۷۵ آمپر و تغییر ولتاژ را ساخته بود. بروی هم چهار توربین، شانزده دینام را فعال می‌ساختند.

جزئیات مهم و متعدد این تأسیسات با دقت تهیه شدند: عایق‌سازی زمین گروه ژنراتورها، کلیدهای ویژه‌ای که بوسیله آنها می‌توانستند در صورت تغییر جهت گردش توربین، جریان برق هر گروه و نیز هر دینام را قطع کنند (کوپلینگ تاشونده یک دینام برای کار موتوری آن می‌تواند خطرناک باشد)؛ امکان ایجاد اتصال به زمین میانه مدار قدرت و غیره.

خط هوایی به یک خط زیرزمینی به طول دو کیلومتر وصل می‌شد تا به مرکز شهر راه یابد. ولتاژ خط در ورود به شهر بوسیله کموتاتورهایی به ۶۰۰ ولت کاهش می‌یافت که ولتاژ متناسب توزیع در شبکه تراموهای لیون بود. یک پست فرعی در میانه خط ساخته شده بود که دارای سه کموتاتریس (تبدیلگر گردان) برای تبدیل جریان مستقیم به متناوب و تهیه جریان سه فازی برای شرکت نیرو و روشنایی گرنوبل بود. در موارد لزوم کار این کموتاتریس‌ها معکوس می‌شد و جریان سه فاز خط ثانوی به جریان مستقیم برای مصرف شهر لیون تبدیل می‌شد.

برتریهای این مجموعه در سادگی تأسیسات آن و فرمانهای مربوطه بود. نتایج آن چنان رضایتبخش بود که کاربرد آن نه تنها ادامه یافت بلکه حتی در دوره‌ای که مشکلات اولیه مربوط به انتقال جریان متناوب، سرعت و گسترده‌گی برطرف می‌شدند، رواج گرفت.

بین سالهای ۱۹۱۱ تا ۱۹۱۷ شدت جریان را دو برابر کردند و به ۱۵۰ آمپر، و فشار را به ۱۰۰۰۰۰ ولت رسانیدند. گروههای مولدهای جدیدی که در هر کلکتور ۴۰۰۰ ولت می‌دادند ساخته شدند. کارخانه‌های متعددی در طول مسیر این خط برپا شدند و برای اتصال خط با این کارخانه‌ها ابزارهای بدیعی اندیشیده شد. اصلاحات دیگر، بویژه کاربرد دینامهای ۷۵۰۰ ولتی، در سالها ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۹ انجام گرفت. در سال ۱۹۳۶ فشارکاری به ۱۲۵۰۰۰ ولت و مقدار مصرف برای شدت ثابت ۱۵۰ آمپر به ۱۸۰۰۰ kW رسید. تنها غم همسانی با دیگر شهرها بود که سبب شد لیون جریان مستقیم موتیه را، که جریان مستقیم مورد استفاده در فرانسه بود، رها سازد.

۱. Moutiers: محلی در ساووا، که در کوههای آلپ شمالی فرانسه، هم‌مرز با ایتالیا و سویس است.



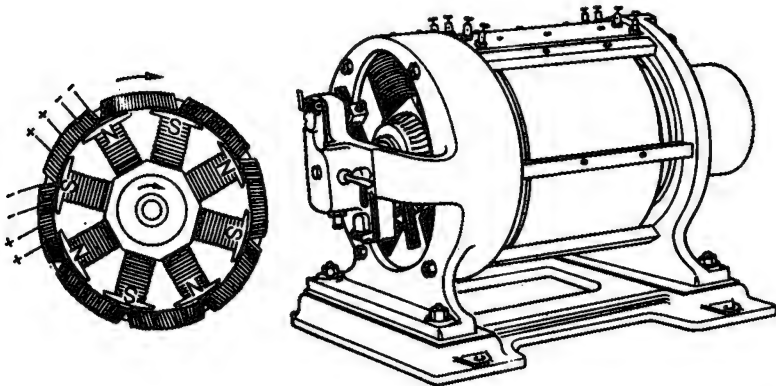
آقای رنه توری با درگیر شدن در این کار در سال ۱۸۹۰ به آزمایشی سرنوشت‌ساز دست زد. این واقعیت که فشارکاری خطوط در جریان متناوب در آن زمان تنها در حدود ۲۵۰۰۰ ولت بود و تنها در سال ۱۹۱۴ بود که توانست به آستانه ۶۰۰۰۰ برسد می‌تواند این کار را توجیه کند. اما آقای توری با توسعه ظرفیت تأسیسات خود طی چندین دهه، روشن‌بینی و تهور خود را نیز نشان داده است. دنباله حوادث، پس از یک دوره کاربرد انحصاری جریان متناوب نشان داد که انتقال فشارهای بالاتر از ۵۰۰۰۰۰ ولت در جریان مستقیم با صرفه‌تر از جریان متناوب است. در اوایل سالهای ۱۹۷۰ این تکنیک به سوی پیوستگی جریانهای مستقیم با یکدیگر با فشارهای ۸۰۰۰۰۰ تا یک میلیون ولت گرایش یافت. بدین ترتیب، می‌توان گفت که آقای توری در این زمینه خود را به صورت پیشگام نشان داده است و ساخته‌های وی در حال حاضر اهمیت تاریخی قابل توجهی دارند.

## جریان متناوب

از جنبه نظری، ساختن ماشینهای جریان متناوب<sup>۱</sup> آسانتر از ساختن دینام با جریان مستقیم است، زیرا برای تولید جریان متناوب تنها باید دو حلقه مسی را روی محور روتور کار گذاشت و جاروبکی با هر حلقه اصطکاک داشته باشد؛ درحالی که ساخت کلکتور کار بسیار دشواری است.

آلترناتورهای نخستین: آقای گرام در همان اوایل کار آلترناتورهایی ساخت که با دینامهای وی تنها تفاوت بالا را داشتند. اما از همان زمان، گرچه جریان متناوب هنوز هیچ جنبه صنعتی نداشت و تنها می توانست در تغذیه لامپهای قوسی، که در گذشته از آنها سخن گفتیم، به کار رود، تفکر تکنسین ها از کندوکاو نایستاد. بزودی دریافت شد که روی این جریان متناوب و وضع متقابل القاگیر و القاگر می توان حساب کرد و این کار راه را برای هر ترکیب هندسی ممکن باز می گذارد - ترکیباتی که تنوع دستگاه قرقره ها و چگونگی پیوست آنها با یکدیگر نیز بدانها اضافه می شود. بازیهای ممکن ترکیبات راه حلها، دقیقاً انگیزه پیدایش انواع آلترناتورهایی بوده اند که در سالهای ۱۸۸۰ و بعد طراحی و ساخته شدند و پس از مدت کوتاهی از جریان متناوب ساده به جریان چند فاز رسیدند.

این کار با ساختن آلترناتورهای دارای القاگر گردان در داخل القاگیر ثابت شروع شد. مثلاً

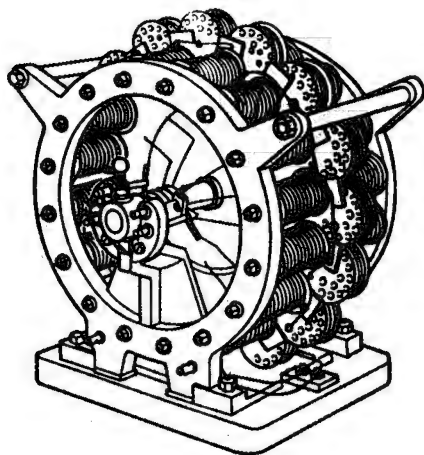


شکل ۳۸. آلترناتور گرام، مشهور به دستگاه تقسیم (۱۸۷۷ - ۱۸۷۹).

سمت چپ: نمایه القاگر گردان، دارای هشت قطب، داخل حلقه القاگیر ثابت.  
سمت راست: نمایه دستگاه خود راه انداز، در انتهای چپ آن، تحریک کننده دیده می شود. این تحریک کننده شامل حلقه‌ای (در مرکز) است که بین چهار قطب القاگیر ثابت می گردد. تنها یک فلکه، محوری را که حامل روتورهای آلترناتور و دینام راه انداز است می گرداند.

دستگاه تقسیم گرام که در سال ۱۸۷۸ برای روشن کردن شمعهای یا بلوچکوف ساخته شد، چنین بود (شکل ۳۸). القاگر یک چرخ دنده واسطه مغناطیسی بود که داخل حلقه مغناطیسی ثابتی که از ورق آهن نرم ساخته شده بود می گردید. این حلقه هشت قرقره مشخص داشت که با زاویه ۴۵ درجه از یکدیگر جدا شده بودند. قرقره‌ها هر یک چهار بخش داشتند که با اتصال زنجیری یا موازی با یکدیگر مربوط می شدند. هر بخش یک شمع را تغذیه می کرد و بدین ترتیب جریان توزیع شده بود.

مسئله تحریک قرقره‌ها به شکل خاصی مطرح شد زیرا ایجاد مستقیم آن با جریان تولید شده بوسیله خود ماشین، مثل دینامها، امکان نداشت. دو راه حل همزمان پیشنهاد شدند: نخست گذراندن بخشی از جریان القاگیر از یک دستگاه فرعی کلکتور-کوموتاتور بود؛ کاری که یک خود راه اندازی واقعی بود. راه حل دوم استفاده از یک دینام ضمیمه بود که جریان مستقیم آن قرقره‌های القاگر را تحریک می کرد. برای اینکه از دو تسمه انتقالی استفاده نشود، یکی برای آلترناتور و دیگری برای دینام، دینام بی درنگ بر روی همان پایه و محوری قرار گرفت که آلترناتور قرار داشت. این مکانیسم را به طور کاملاً عامیانه، از خود راه اندازی نامیدند. این راه حل، بی درنگ پذیرفته شد.



شکل ۳۹. آلترناتور تقسیم، زیمنس و هفتر فون آلتک (۱۸۷۸).

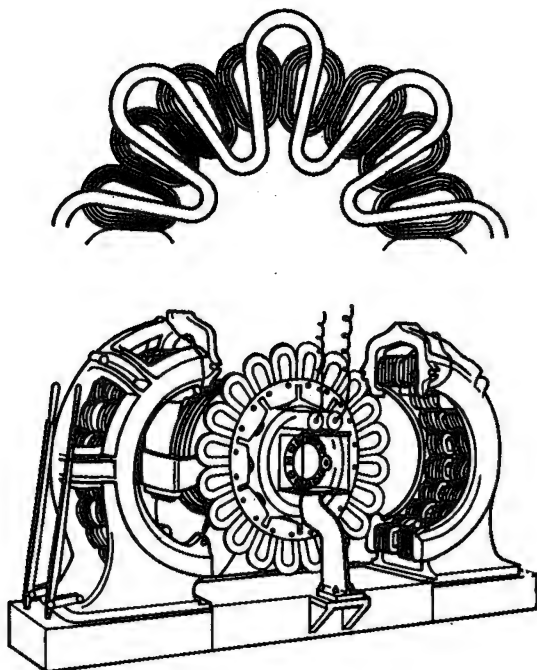
حلقه‌های ثابت حامل القاگرهای برقی از دو سوی روتور گردان با القاگرهای تخت و بدون هسته دیده می‌شوند.

زیمنس نیز در سال ۱۸۷۸ آلترناتوری با القاگر گردان ساخت که مستقیماً با دستگاه کلارک - پس از اینکه آقای هنری وایلد آن را در سال ۱۸۶۷ ساخت - اتصال داشت. دیده می‌شود که کارهای پیشینان روی ابزارهای آزمایشگاهی تا چه اندازه تحت تأثیر تحقیقات برای ساختن دستگاههای صنعتی بوده است.

القاگیر این دستگاه یک حلقهٔ مفرغی بود که چارچوبهای حامل سیم‌پیچها، با بستهای فلزی روی آن نصب شده بودند (شکل ۳۹). قرقره‌های القاگیر، به تعداد ۸ و ۱۲ و ۱۶ بدون هستهٔ مغناطیسی بودند. این نخستین ماشینهای با القاگیر بدون هستهٔ مغناطیسی بود. حلقهٔ متحرک سبکتر بود، در نتیجه اتلاف ناشی از گرم شدن و جریان فوکو را کاهش می‌داد. این القاگیر بین دو حلقهٔ ثابت مغناطیسهایی برقی القاگر به تعداد برابر، همین و همان مساوی با قرقره‌های القاگیر، می‌گردید. تناوب قطبها به گونه‌ای بود که میدانهایی با جهات مخالف ایجاد می‌شدند.

فراخوانی راه‌حلها: القاگیر ثابت، القاگیر گردان، با یا بدون آهن، طوفان راه‌حلها آغاز شده بود. با آوردن چند نمونه، موضوع روشن می‌شود.

در سال ۱۸۸۲ سباستیانو تسینانی دو فرانتی<sup>۱</sup> با استفاده از طرح ویلیام تامسن دستگاه بویینی

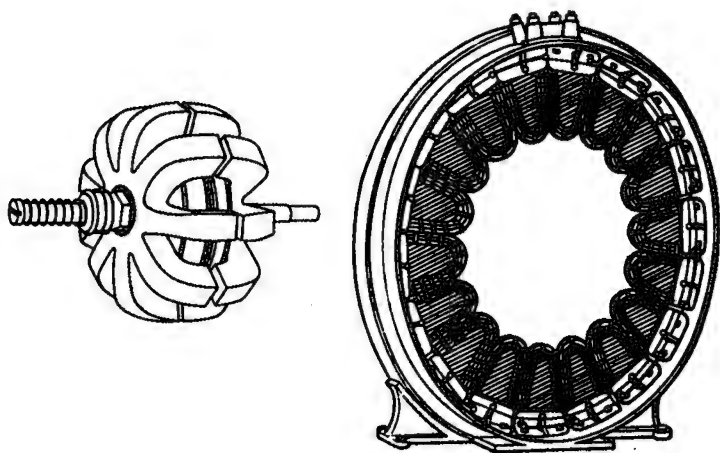


شکل ۴۰. آلترناتور فرانسی - تامسن (۱۸۸۲).

در پایین، دو بخش القاگر به طور جدا از هم نشان داده شده است تا موقعیت القاگر دیده شود. در بالا، محل تسمه مسی، که القاگر است نسبت به قرقره‌ها و القاگر نمایانده شده است.

از القاگر گردان ساخت که شکل آن کاهش عرض چاک موجود بین دو حلقه القاگر را ممکن می‌ساخت (شکل ۴۰). القاگر دیگری بدون آهن هم در کار بود که تسمه مسی عریضی با ضخامت تنها ۲۰ میلیمتر و طول ۳۶ متر بود. این تسمه فلزی در میدان پیچیده شده بود، و بدین ترتیب، دوازده لایه عایق شده بوسیله نوارهای لاستیکی پهلوی هم گذاشته می‌شد. سبک بودن القاگر، دور زیاد حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ در دقیقه را ممکن می‌ساخت.

القاگر دستگاه تامسن - فرانسی دو سال بعد با تعویض دستگاه پر پیچ و خم با قرقره‌های جدا از هم مستقر روی حلقه بهتر شد. بدین ترتیب، با شگفتی دیده شد که شکلهایی که سی سال قبل پیدا شده بودند و دارای آهنرباهای دائمی مگنتهای بزرگ اولیه بودند از نو پدیدار شدند. این دستگاه



شکل ۴۱. در سمت راست، القاگیر و در سمت چپ، القاگر آلترا تاور موردی - ویکتوریا.

با کاهش دوره به ۶۰ تا ۱۰۰ دور در دقیقه، ولتاژ بسیار زیادی در حدود ۱۰۰۰۰ ولت تولید می‌کرد و تا ۲۰۰۰۰۰ لامپ را روشن می‌ساخت.

در سالهای ۹۰، ماشین‌سازان دیگری نظیر پاتن بر پایه اصول فرانتی، آلترا توره‌های افقی ساختند. یکی دیگر از مدل‌های اصیل این دوره، آلترا تاور ساخت آقای و. م. موردی<sup>۱</sup> بود که در انگلستان شرکت برانش آن را ساخت. این آلترا تاور یک القاگیر ثابت داشت که از یک حلقه بزرگ تشکیل شده بود که قرقره‌های مشابه قرقره‌های فرانتی را در داخل حمل می‌کرد. عایق‌سازی این قرقره‌ها با میکا و ابونیت انجام گرفته بود. القاگر آن تنها یک قرقره بوبین بزرگ هم مرکز با محور گردش آن بود که در مرکز حلقه القاگیر جاسازی شده بود. قرقره بوبین اخیر را دو کفشک قطبی نیرومند احاطه کرده بودند که بازوهای خمیده آنها آن را تقریباً به‌طور کامل دربر می‌گرفتند. قرقره‌های القاگیر بین رویه‌های انتهایی این بازوهای دارای اتصال مثلثی گذاشته می‌شدند و فضای خالی بین آنها بسیار کم شده بود (شکل ۴۱).

توجه می‌دهیم که با وجود تنوع شکلهای بخشهای گوناگون ماشینها، همه ماشین‌سازان و همه نظریه‌پردازان این دوره و نیز پس از آن، در پی راهی برای نزدیک شدن به ساختارهای ماشینهای پیشین بودند: کفشکهای قطبی قوی لفافی؛ به حداقل رسانیدن فضای بین قطعات؛ و غیره. گرچه راه‌حلهای بهینه بتدریج به‌دست می‌آید، بدین جهت گوناگونی متعدد مونتاژ، تنها ثمره آزمایشها بود

و بخصوص ناگزیر می‌بایست منتظر مصالح مناسب نظیر: ورقهای آهن، سیم مسین، مواد عایق بود که در کیفیت ویژه این کاربردها تأثیر زیادی داشتند.

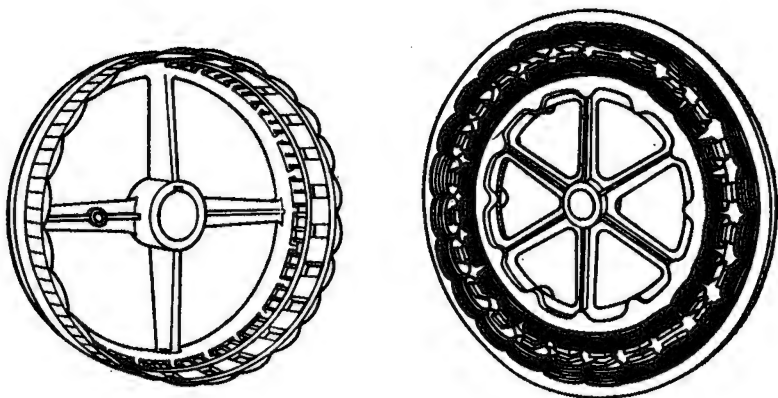
در پایان در این تحول پیدایش منطقی انواع جدید جریانهای برق را باید در نظر داشت که در آن زمان دیگر کم‌وبیش بخوبی شناخته شده بودند.

الفاگر ساخت موردی، اگر دقیقاً سخن گوییم، در الفاگیر تولید جریان موجواره - نه متناوب - می‌کرد. بازده این دستگاه که با نام موردی - ویکتوریا شهرت داشت برای  $250\text{ kW}$  برابر  $95\%$  بود. این دستگاه در  $300^\circ$  دور در دقیقه و با داشتن  $20^\circ$  جفت قطب، جریانی با  $100^\circ$  دوره تناوبی در ثانیه تولید می‌کرد.

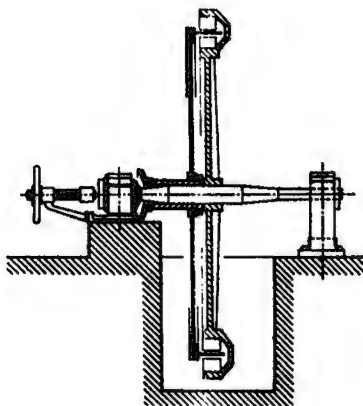
مهندس براون (س. ا. ل.) که در آن زمان در کارخانه آلریکون کار می‌کرد و هنوز با شرکت باوری سهم نبود در سال  $1890$  آلترناتوری ساخت که الفاگر آن گردان و اقتباس از موردی بود. الفاگیر آن حلقه‌ای مغناطیسی و حامل قرقره‌هایی بود که روی بدنه دستگاه محکم شده بودند: اما الفاگر بازوهایی داشت که در اطراف به‌طور فلسی روی هم قرار می‌گرفتند و هر یک از آنها همه سطح بیرونی مربوط به خود را می‌پوشانید. این مکانیسم نوعی توالی قطبهای شمال و جنوب را ایجاد می‌کرد که روی سطح استوانه‌ای، که نسبت به دستگاه بوبینی الفاگیر خارجی شمرده می‌شد، اثر می‌گذاشت. این دستگاه تولید جریان متناوب می‌کرد، نه موجواره. ماشین‌سازان بسیاری این مدل را پذیرفتند، اما ساختی دشوار و نیز نواقصی: نشت مغناطیس و بی‌نظمی میدان در آن بود. آلترناتورهای بزرگ: بیشترین تعداد آلترناتورهایی که تا اواسط سالهای  $90$  ساخته شدند، صرفنظر از نوع آنها، ابعادی در حدود دینامهای اولیه داشتند. گردش آنها توسط فلکه و تسمه مربوط به یک ماشین محرک، ماشین بخار پیستونداری یا یک توربین آبی از نوع فرانسسیس<sup>۱</sup> یا پلتون بود. توربینهای بخار بتازگی ساخته شده بودند. و مسأله انتقال حرکت به‌نحوی در شرف حل شدن بود. در مورد موتور حرارتی (با هوای گرم) پیستوندار بدینجا رسیده بودند که دسته آلترناتور را مستقیماً به لنگ ماشین بخار وصل کنند. قطعه گردان آلترناتور، نقش چرخ طیار تنظیم گردش موتور را داشت (شکلهای ۴۲ و ۴۳).

بدین ترتیب، حدود سال  $1895$  مؤسسات گوناگونی، از جمله مؤسسه فارکو، دست به ساختن دستگاههایی زدند و آنها را تحت نام الکتروژن، که هنوز شهرت دارد به فروش رسانیدند. قطعه گردان این دستگاهها، الفاگر بود که قطر بیرونی آن به  $5$  متر می‌رسید. قسمت بوبینی آن بخوبی طرحریزی، و روی حلقه‌ای چدنی نصب شده بود و این قطعه طوقه چرخ بزرگ هشت پره‌ای بود

۱. Francis، جیمز بیچینو (۱۸۱۵-۱۸۹۲): مهندس انگلیسی هیدرولیک که در ۱۸۳۳ به امریکا رفت.



شکل ۴۲. القاگیر (سمت چپ) و القاگر (سمت راست) آلترناتورهای بزرگ پایان سده نوزدهم. آلترناتور پاتن: القاگیر، ثابت و حامل حلقه قرقه‌های - تخت است. این قرقه‌ها به‌طور برجسته قرار داده شده‌اند و در فضای خالی بین حلقه‌های القاگر گردان جای گرفته‌اند. رجوع کنید به شکل ۴۳.



شکل ۴۳. آلترناتور پاتن. در این شکل، موقعیتهای القاگیر (سمت چپ، خطوط پر) ثابت و القاگر (سمت راست) گردان نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.



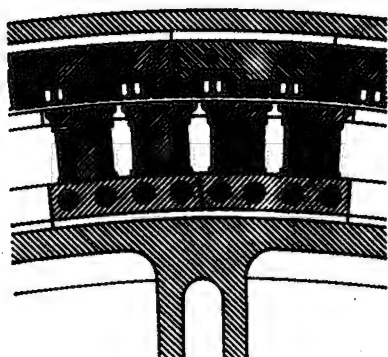
که ناف آن با محور چرخش مطابقت داشت. طوقه ثابتی که روی سطح داخلی خود، هسته‌ای مغناطیسی از ورقهای عایق شده آهن را حمل می‌کرد این چرخ را در خود گرفته بود. در این هسته، چاکهایی زده شده بود که بوبینها را جا می‌دادند.

این ماشین بزرگ را اوتن - لوبلان - فارکو<sup>۱</sup> می‌نامیدند. سازنده این ماشین، آقای فارکو، در آن زمان در سن - کانتن بود. آقایان اوتن و لوبلان، مخترعان مکانیسمی بودند که نوسان فازهایی را مستهلک می‌ساخت که ممکن بود بین چند آلترناتور همزمانی که موازی یکدیگر کار می‌کنند پدید آیند. این ساختاری نسبتاً ساده بود. برجستگیهای قطبهای القاگر که در بخش مجاور فضای خالی بیرون زده بودند عمود بر صفحه این چرخ، با پیچ و مهره‌های مسین محکم می‌شدند. سرهای آنها روی هر صفحه به طوری با یکدیگر هم آمده بودند که تشکیل یک رسانای پیوسته در سراسر حلقه را می‌دادند (شکل ۴۴). این مجموعه در جرم القاگر، قفسی را تشکیل می‌داد که آثار آن بر واکنش القاگر، حرکت منظم دستگاه را، در صورت اتصال زنجیری چند آلترناتور، تأمین می‌کرد. در آن زمان افزودن مستهلک‌کننده نوسان فازها در طرح تناوبگر (آلترناتور) ها تکامل بسیار پر اهمیتی بود. این نمونه بسیار جالبی از وسایل فنی است که در این زمان تکامل یافت و رفته رفته کاملاً رضایت بخش و عالی شد.

فارکو تنها کسی نبود که در تکامل آلترناتورهای با القاگرهای گردان بزرگ کار کرده است. این، دستگاهی بود که سرعت برای استفاده در سائترال‌های حرارتی با ماشینهای پیستوندار عمومیت یافت و تا آن زمان که رفته رفته در سالهای ۲۰ و ۳۰ ماشینهای کلاسیک جای خود را به توربینهای بخار واگذارند، در کار بود.

ماشین فارکو نمونه‌ای عالی از آن استاد کاری است که تکنسین‌ها و فیزیکدانان در این زمینه در مدت بسیار کوتاهی بدان دست یافتند. این تکنولوژی به طور قطعی تثبیت نشد. گرچه آلترناتورهای بزرگ فارکو یک جریان ساده موجوده تولید می‌کردند اما چند سال پس از آن نخستین واحدهایی از این نوع برای تولید جریان دو فازی دست‌کاری شدند، به طوری که خواهیم دید این زمان حدود ۱۸۹۰ بود.

آهن گردان و قرقره‌های ثابت: سرانجام گروه دیگری از آلترناتورها در سال ۱۸۹۰ ساخته شدند. اینها آلترناتورهای با جرمهای مغناطیسی گردان بودند. این نام اصول اساسی طرح آن را بخوبی بیان می‌کند. این همان اندیشه قدیمی پیچ بود. القاگر و القاگیر ثابت بودند و تغییر میدان مؤثر در ایجاد جریان القاگیر، در نتیجه گردش جرمهای مغناطیسی در کنار تکیه‌گاههای قرقره‌هاست. مسأله



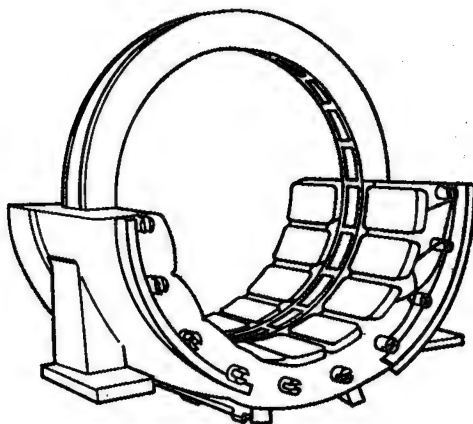
شکل ۴۴. مستهلک‌کننده اوتن - لوبلان.

روی حلقه القاگر گردان یک آلترناتور - چرخ طیار بزرگ حلقه بیرونی مربوط به القاگیر ثابت است. روی حلقه داخلی (القاگر گردان) در برجستگیهای قطبی مغناطیسهایی برقی، شش میله مسی که نوسان فازها را مستهلک می‌کنند، دیده می‌شوند. در این شکل حدود دو دوجین حلقه دیده می‌شود. پیشرفته بودن سطح تکنیکی که ساخت چنین دستگاههایی را ممکن ساخته است، در نظر بگیرید.

اتصالها ساده شده بود و با از میان رفتن لزوم حلقه‌ها و لغزنده‌ها، بخش متحرک می‌توانست با سرعت زیادی بگردد، با این امتیازات، ساخت آلترناتورهای با بسامد زیاد (۲۰۰۰۰ دور) ممکن شد و کاربرد آنها تا سال ۱۹۲۰ ادامه یافت. آلترناتورهای آهنی، مانند مکانیسم موردی، با گردش خودشان، جریان موجواره و غیر متناوب ایجاد می‌کردند.

آقایان موردی در سال ۱۸۸۳، ایلایهو تامسن در سال ۱۸۹۰، کارخانه آرلیکون و شمار زیاد دیگری از ماشین‌سازان در سالیان بعد، به کمک این اصل مولدهایی برای جریان متناوب ساختند اما شکلها و ترتیب ساختارها، سیم‌پیچی و جریمهای گردان آنها بسیار گوناگون بود. در اینجا هم یک اصل هندسی بنیادی می‌توانست دارای تنوع بسیار راه‌حلهای اساسی باشد. آقای موردی یک قرقره تنهای القاگر در حلقه را به کار می‌گرفت که حامل جرم مغناطیسی به شکل  $\cap$  بود. قرقره‌های القاگیر روی شاخه‌های  $\cap$  سوار بودند و چرخ مغناطیسی بین آنها می‌گردید. کمی بعد، در سال ۱۸۸۸، آقای کینگدام قرقره‌های القاگر و القاگیر را متناوباً بین کفشکهای قطبی یک بدنه استوانه‌ای جاسازی کرد و داخل این بدنه، آهن گردان را قرار داد.

آهن گردان در آلترناتور آقای ایلایهو تامسن ساخته سال ۱۸۹۰ یک چرخ دندانه‌دار بود.

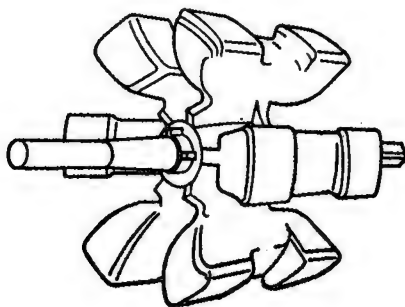


شکل ۴۵. جزئیات ساختمانی بخش ثابت یک آلترناتور آرلیکون دیده می‌شود که القاگیر ثابت حامل دو طوقه موازی با قرقره‌هاست. بخش بالایی را می‌شود جدا کرد تا تعمیر دستگاه آسان باشد. در مرکز، طوقه القاگر، آن هم ثابت، و قرقره‌های آن قرار دارند. قطعه گردان، آهن به شکل ۴۶ است.

قرقره‌های ثابت هم مرکز با محور گردش، آن را تحریک می‌کردند. قرقره‌ها قطبهای شمال را تشکیل می‌دادند درحالی‌که بدنه و جرمهایی که روی بدنه نصب شده بودند تا حامل قرقره‌های القاگیر باشند قطبهای جنوب بودند.

کارخانه آرلیکون، نخست با مدیریت آقای س. ا. ل. براون به ساختن آلترناتورهای با آهن گردان دست زد که شکل آنها با دانشمندی انتخاب شده بود. طوقه‌ای از فولاد نرم، بدنه را تشکیل می‌داد (شکل ۴۵). بر رویه داخلی طوقه دو حلقه فلزی کار گذاشته شده بود و قرقره‌های القاگیر را به‌طور ردیفی بین این دو حلقه قرار داده بودند. در تمام طول این ناودان دایره‌ای باز به‌طور ردیفی قرقره‌های القاگر کار گذاشته بودند. ترتیب قرارگیری قطعات با دقت زیاد حساب شده بود تا دستکاریهای احتمالی برای تعمیر، و به‌کاراندازی آن، بدون اوراق کردن نابه‌هنگام دستگاه یا از دقت افتادن جای قطعات، انجام گیرد. آهنهای گردان که در میانه بدنه‌ای این چنین مجهز، جاسازی شده بودند میله‌ها یا چرخهای حامل کفشکهای قطبی دارای اشکال گوناگون سازگار با نوع آلترناتور مربوط به خود بودند (شکل ۴۶).

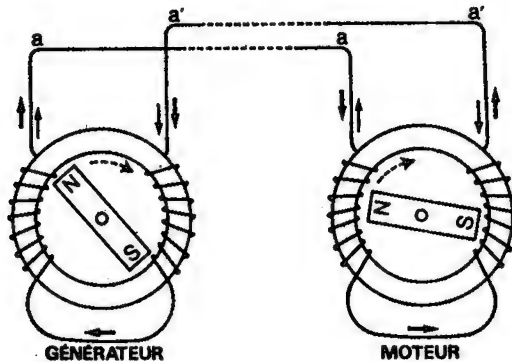
همه این ترکیبات ممکن هندسی ظاهراً در مدتی کمتر از ۱۰ سال به پایان رسیدند و همه ترتیبات مربوط، در عمل آزمایش و برای پاسخگویی به نیازهای گوناگون کاری، اصلاح شدند. از زمان



شکل ۴۶. القاگیر از نوع آهن گردان آلترناتور ۷۰ اسبی آرلیکون. این القاگیر در قرقره القاگر شکل ۴۵ قرار دارد.

ساخت نخستین آلترناتورهای گرام تا زمان آلترناتورهای فارکو، تکنیکهای این دستگاه، راه‌حلهای بسیاری را تجربه کرد، و کثرت آنها در مدتی این چنین کوتاه، نشانه سطح بالای مکانیکی است که ماشین‌سازان پیش از آغاز ربع پایانی سده نوزدهم بدان دست یافته بودند. برای ما هم که در روزگاری پر از شگفتیها زندگی می‌کنیم حیرت‌آور است که گرفتاریهای مربوط به ساخت دستگاه قرقره‌ها، بخش اساسی همه این ماشینها، با چه سهولتی برطرف شدند. پس از تنها چند سال تجربه کورکورانه، تکنیکی این چنین انعطاف‌پذیر به دست آمد که ساخت چندین نوع دستگاه قرقره‌ها، با وجود اینکه تنها چند ماده عایق‌کننده موجود بود، میسر شد. چنانچه قرقره‌هایی که در سالهای ۱۸۵۰ - ۱۸۶۰ روی ماشینها گذاشته شدند با قرقره‌های سالهای ۱۸۸۰ - ۱۸۹۰ مقایسه شوند می‌توان از تراز بالای دستاوردهای تکنیکی این دو یا سه دهه، آگاهی یافت. باید پذیرفت که تحول عمیق شکلهای، ابعاد و ساختارهای آلترناتورها، نتیجه دگرگونیهای ژرف اصول راهنمای ساخت این ماشینها نبوده است، بلکه ناشی از طبیعت و کیفیت مصالحی بود که الکترو تکنسین‌ها در اختیار داشتند، مصالحی که ترکیب و مشخصات آنها با بردباری توسط متالورژها و شیمی‌دانان بررسی شده بود.

موتورهای همزمان: آلترناتورهای اولیه‌ای که جریان متناوب ساده تولید می‌کردند، طبق نخستین اصطلاح رایج، یعنی تکفاز، کاربرد موتورهای دینامی با همان تشکیلات را آزمایش کردند. در واقع آلترناتورهایی مورد گفت‌وگو هستند که بتوان آنها را به عنوان موتور به کار انداخت - دقیقاً همان‌طور که ده سال پیش با دینامهای دارای جریان مستقیم عمل شده بود. اینها موتورهای همزمان بودند، یعنی



شکل ۴۷. نمایه طرز تغذیه موتور همزمان بوسیله یک آلترناتور.

این مولد و موتور، دو دستگاه یکسان هستند؛

القای ثابت با دو قرقره؛ القاگر گردان، فقط یک آهنربای ساده دو قطبی است.

اینکه گردش این روتور با گردش روتور مولد همزمان شده و مزیت گردش با سرعتی مستقل از ولتاژ تغذیه شبکه را داشتند (شکل ۴۷). درعین حال شامل نقص فقدان خود راه اندازی بودند.

آقای گالیلئو فراری ایتالیایی در سال ۱۸۹۴ می بایست نشان داده باشد که روتور موتور همزمان در حالت توقف، بوسیله دو نیروی برابر و متقابل تحریک می شده است. با ارائه یک میدان متناوب ساده بوسیله یک بردار دارای جهت ثابت اما با مدول متغیر، در دو جهت از صفر تا حداکثر، نمایش هندسی این حالت داده شده است. با ایجاد یک عدم تعادل با یک ضربه در یکی از دو جهات ممکن گردش، یکی از دو گشتاورهای چرخشی بر دیگری پیشی می گیرد و تا آن اندازه افزایش می یابد که سرعت گردش بسرعت مربوط به همزمانی تثبیت شده بوسیله فرکانس جریان تغذیه (استاتور) می رسد.

برای قدرتهای کوچک، این موتور با دست راه اندازی می شد، اما برای قدرتهای بزرگ می بایست از دینام الکترومغناطیسی استفاده شود، و بنابراین، آن را به کمک یک منبع کمکی جریان مستقیم، مثلاً آکومولاتور، به طور موقتی همچون موتوری به کار می انداختند.

در واقع موتور همزمان تنها برای قدرتهای بسیار ضعیف مفید بود، یا برعکس، برای گروههای تبدیل کننده جریان متناوب به جریان مستقیم.

بالین همه، از همان زمان موتورهای دارای جریان مستقیم و مجهز به کلکتور گرام را با جریان

متناوب تغذیه می‌کردند. تنها کافی بود تحریک مغناطیسه‌های برقی القاگر با اتصال زنجیری انجام پذیرد. جهت جریان هم‌زمان، هم در القاگر و هم در القاگر معکوس می‌شد و گشتاور دوران همواره در یک جهت تأثیر می‌کرد. با این حال کموتاسیون، دشوارتر و مستلزم استفاده از کفشکهای قطبی متورق بود تا اتلاف جریان فوکو کاهش یابد؛ نتیجه‌ای که زیمنس در سال ۱۸۸۴ بدان رسیده بود. موتور با اتصال زنجیری هم مثل موتور با جریان مستقیم، ویژگی جالب خود را در ایجاد گشتاور دورانی نیرومندی برای راه‌اندازی نشان داد، مزایایی که در موتور متناوب دارای کلکتور هم دیده می‌شد.

در سالهای ۱۸۸۷ - ۱۸۸۹ آقای ایلایو تامسن موتور جدیدی اندیشید که به موتور دفعی شهرت یافت. سیستم آن شامل تغذیه القاگر با جریان متناوب و اتصال کوتاه جاروبکهایی بود که با یکدیگر روی خط بی‌اثر فرجه مناسبی داشتند. بدین ترتیب، یک گشتاور حرکت‌دهنده پدید می‌آمد. زمانی که القاگر سرعت اسمی کار خود دست می‌یافت، تیغه‌های کلکتور بوسیله یک مفتول متحرک، اتصال کوتاه می‌یافتند و اتلاف برخاسته از اصطکاک از میان می‌رفت. در واقع طرز کار آن با موتور القایی یکی است.

آقای اتکینسون در سال ۱۸۸۸ با افزودن سیم‌پیچ دوم القاگر، این نوع موتور را تکمیل کرد. بدین ترتیب، معکوس شدن جهت حرکت ممکن شد و نیز از دو سیم‌پیچی ۹۰ درجه که یکی را «میدان» نامید که کار کموتاسیون را آسان می‌کرد استفاده کرد.

این مدلها تنها قدرتهای ضعیفی تولید می‌کردند و با مدارهای عمومی روشن‌سازی متصل می‌شدند. آنها نمونه‌های بسیار مشخص انواع ماشینهای کلاسیک آن زمان را تشکیل می‌دادند بدون اینکه حتی اصل ساختمانی آنها دست‌کاری شده باشد و پیش از آنکه چند سال بعد موتورهای دارای میدان گردان تغییری در آنها بدهند.

به‌سوی جریانهای چند فاز: با این همه، پیش از آنکه در آستانه سالهای ۱۸۹۰ بدان دست یابند، تکنیک دیگری نیز می‌بایست تسخیر می‌شد که در آینده در رشته‌های تولید، انتقال و توزیع جریان برق، در رده نخست عوامل تحول همه تکنیکهای سده بیستم قرار می‌گرفت. بحث درباره تکتیر شکلهای جریان متناوب با به‌کارگیری جریانهای چند فاز است.

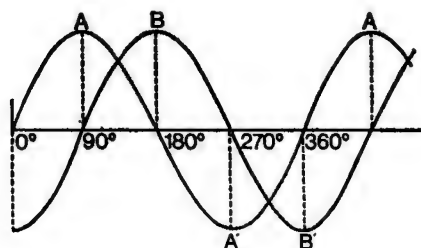
تولید جریانهای چند فازی حتی پیش از آنکه طرح شکل آن روشن شده باشد آغاز شده بود. به یاد آوریم که در این زمان ماشینهای الکترومغناطیسی، مانند ماشین پیکسی، یا ماشین کلارک پیش‌نمونه ماشینهای دیگری شدند که تولید جریان متناوب می‌کردند و با یک‌سوی کردن

این جریان بوسیلهٔ کموتاتوری که روی محور ماشین قرار داده می‌شد، جریان مستقیمی به دست می‌آمد. نخستین مولدهای بزرگ الکترومغناطیسی مناسب کارگاه، مانند ماشینهای مریانس یا هولمز تولید جریان متناوب یا موجواره‌ای می‌کردند که مستقیماً به لامپهای قوسی وصل می‌شدند. باین حال، همان‌طور که دیده شده است، هنوز گرایش به جریان مستقیم قوی بود درحالی‌که مثلاً موتورهای نخستین و نیز لامپهای اولیه روشنایی به‌کار گرفته شده بودند و کاربردهای برق از رشته‌های گالوانوپلاستی و الکتروماتلورژی فراتر رفته بود. اتومبیل‌های برقی نیز گویا در سالهای نخست به برق مستقیم نیاز داشتند، و در کشمکش تلخی که در سالهای ۱۸۸۰ بر سر مناسبترین شکل جریان برای انتقال برق درگرفت، درحالی‌که در این لزوم آشکار یک استدلال تکمیلی خوابیده بود، طرفداران برق مستقیم تصور کردند که بدرستی ثابت می‌کنند که: «انتقال انرژی به شکل برق با جریان مستقیم انجام خواهد شد نه با جریانی دیگر».

باین حال، طرفداران برق متناوب که طی چندین سال فقط پشتیبانی هواداران بسیار صمیمی خود را داشتند عوامل پیروزی خود را در نوسازی سه عنصر بنیادین یک سیستم جدید یافتند: مولدهای با جریان چند فاز؛ موتورهایی که با این نوع جریان کار کنند؛ و سرانجام برای اینکه انتقال برق فشار قوی از لحاظ اقتصادی قابل قبول افتد، ترانسفورماتور استاتیک لوسین گولار و جان گیس. تأکید می‌کنیم که پیدایش همزمان این سه جزء متشکله بود که انگیزه تحول به سوی سیستم نوین کاربرد شد. در واقع در اینجا با تأثیر علت بر معلول، آلترناتورهای با جریان چند فاز در پیدایش موتورهای روبه‌رو هستیم، که فرایند معمولی است، موتور دینامی جز در صورت امکان تولید چنین جریان‌هایی نمی‌توانست مطرح شود. اختراع ترانسفورماتور استاتیک پدیدهٔ مجزایی بود، اما پیشرفت آن طبعاً بستگی شدیدی به دستگاه پیشین داشته است.

در سال ۱۸۷۷ آقایان گرام و لونت بدون اینکه با جریانهای اولیه چند فازی آشنا باشند آلترناتور خودشان که دنده واسطه آن مغناطیسی بود برای تغذیه شمعهای یابلوچکوف، جریان چند فازی ایجاد کردند. دنده واسطه مغناطیسی مولد گرام، القاگر گردانی بود که هشت قطب آن متناوباً شمال و جنوب بودند. دیده شد که سیم‌پیچهای القاگر، دور یک هسته حلقوی ردیف شده بودند و چهار برابر قطبهای القاگر بودند تا هیچ فضای خالی باقی نماند. آنها به‌طوری وصل شده بودند که چهار گروه تشکیل می‌دادند و گروه‌های قرقره‌ها بین آنها قرار داشتند، به‌طوری‌که در سراسر این دایره، یک‌نواخت توزیع شده بودند. هر گروه القاگر، مدار یک شمع برقی را تغذیه می‌کرد.

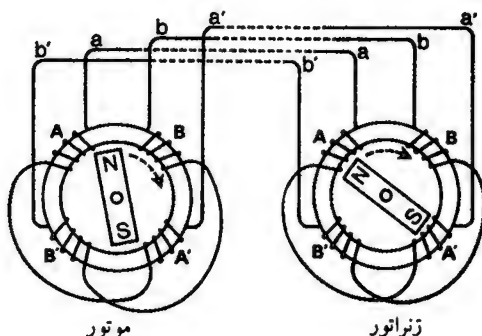
تنها کافی است به ترتیب هندسی این هیئت دقت کنیم تا متوجه شویم که در هر یک از چهار



شکل ۴۸. نمایه یک جریان متناوب دو فاز ربع دور از دید Sylvanus Thompson.

قرقره، جریان القاگیر یک چهارم دوره با قرقره‌های مجاور خود تفاوت دارد (شکل ۴۸). آقای گرام، آلترناتوری ساخته بود که چهار مدار الکتریکی مختلف تهیه می‌کرد. هر یک از این مدارها تشکیل حلقه‌ای می‌داد که شمعی روی آن جاسازی شده بود. گرام یک راه حل خوب الکترومکانیکی را دریافته بود. وی به تحلیل ژرف این پدیده نیندیشد و بدون شک نمی‌توانست هم بدین کار بپردازد. از سوی دیگر، وی توانست چهار جریان با اختلاف فاز تولید کند نه جریان چند فازی بدان معنی که بعدها مصطلح شد. بخصوص برای وی این مسأله که چهار سیم را به بستهای یک موتور دینامی مربوط کند که القاگیر ثابت (استاتور) همان نوع سیم پیچی القاگیر مولد را داشته باشد، مطرح نبود (شکل ۴۹).

چند سال بعد، تنها فیزیکدانان متوجه شدند که نه تنها ایجاد جریانهای چند فازی ممکن است



شکل ۴۹. نمایه تغذیه موتوری با جریان دو فازی.

قرقره‌های القاگیر متناسب با قطر حلقه به طور جفتی بسته شده‌اند. در قرقره BB' جریان متناوبی پدید می‌آید که ربع دور روی جریان قرقره AA' با هم فاصله دارند.



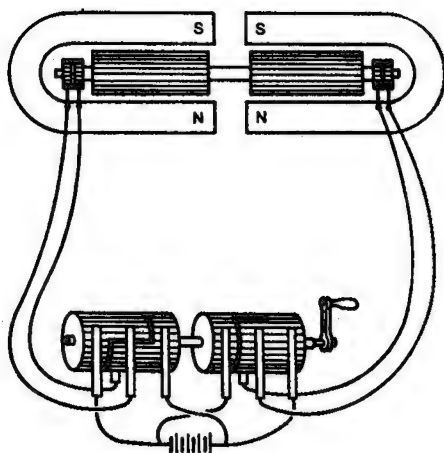
بلکه حتی چنین جریانی برای صنعت لازم است. آقای گوردون انگلیسی در سال ۱۸۸۳ در محل پادینگتن<sup>۱</sup> نزدیکی لندن، آلترناتورهای دو فاز ی بزرگی نصب کرد. آقای وین<sup>۲</sup> در سال ۱۸۸۶ گویا از نخستین کسانی بود که نوعی سیستم توزیع برق با جریانهای چند فاز ی را پایه گذارد، گر چه آن را هم *périphrase* می نامیدند. در حدود سال ۱۸۹۰ چندین آلترناتور ساخته شد که جریان چند فاز ی می داد و از این زمان است که استفاده منظم از این تکنیک آغاز شد.

این گرایش تازه با ساخت موتورهای قوام گرفت که می توانستند مستقیماً چنین جریانهایی - بیشتر سه فاز - تولید کنند. این نوع موتورها زمانی به بازار آمدند که مفهوم میدانهای گردان، که شصت سال سابقه داشت، تعریف شده بود.

میدان گردان: در حوالی سال ۱۸۲۵ فیزیکدانان چندی، تقریباً همزمان، متوجه شدند که یک دیسک برنجی اگر حول مرکز خود در میدان یک عقربه مغناطیسی بگردد، این عقربه از وضع متعادل خود خارج می شود. چنانچه سرعت گردش، بسیار زیاد شود، خود عقربه به گردش درمی آید. بررسیهای نخستین این جریان در سال ۱۸۲۴ بوسیله هنری گمبی<sup>۳</sup>، بهترین سازنده ابزارهای علمی در اوایل سده نوزدهم در فرانسه، انجام گرفت و پس از وی آقای آراگو بود که در همان سال این پدیده را به آکادمی علوم فرانسه اطلاع داد. در این زمان این پدیده با عنوان مغناطیس گردش شهرت یافت. فیزیکدانان انگلیسی و پیش از همه آقایان چارلز بیچ و جان هرشل در سال بعد نشان دادند که این پدیده ممکن است معکوس باشد: آهنربایی که می گردد یک دیسک مسی نزدیک خود را می گرداند. تقریباً همه فیزیکدانانی که بدین مسأله تازه، علاقه مند شده بودند، آزمایشهای خود را دنبال کردند و نتایج تکمیلی دیگری به دست آوردند. اما فاراده بود که بررسی کاملی از آن به عمل آورد و در نوشته های خود درباره القاء، نخستین تحلیل را از آنچه که بعدها جریان فوکو خوانده شد، به دست داد.

در ابتدا از این دستاوردهای عملی هیچ گونه استفاده عملی نکردند و با دنبال کردن تاریخ این دستگاههای گردان تا آلترناتورها، بخوبی فهمیده می شود که چگونه پیش از آنکه بدان برسند راه هموار شده بود. آلترناتورهای ساده و موتورهای همزمانی که بخوبی طراحی شده بودند راه را برای پیشرفت به سوی اشکال دیگر جریان و همزمان به سوی موتورهای دارای میدان گردان باز کرده بودند.

در رشته موتورها این مرحله تازه لااقل در ده سال به پایان رسید. این مرحله راه به دوران کارهای دپره یافت، گر چه وی پیدایش موتورهای سه فاز ی همزمان را که رفته رفته جای بسیار مهمی در



شکل ۵۰. نمایه مارسل دپره از جریانهای دو فاز (۱۸۸۰).

تکنولوژی به دست می آورده پیش بینی نکرد.

مغناطیس گردش در زمان فاراده تصادفاً توجهات را به خود جلب کرد. آقای فوکو مسأله را کمی زنده ساخت. وی اظهار داشت زمانی که یک دیسک فلزی را در یک میدان مغناطیسی می گردانند، جریان القایی که در دیسک ایجاد می شود آن را گرم می کند. بررسیهای دیگری فیزیکدانان به عمل آوردند. اما نخستین موتور القایی ساخت والتز بیلی انگلیسی در سال ۱۸۷۹، حتی مورد توجه سازنده آن قرار نگرفت. وی به جای به کار گرفتن یک آهنربای گردان برای به گردش درآوردن این دیسک، دو مغناطیس برقی را عمود بر هم قرار داد و قرقره های آنها را متناوباً تغذیه کرد. این کار صرفاً یک آزمایش فیزیکی بود و بس.

سال ۱۸۸۰ که آقای دپره نشان داد که می توان با چند پیل و کمک کموتاتور دوگانه ای که هر بخش آن یک القاگیر ماکویی را تغذیه می کند (شکل ۵۰)، دوران کارهای نظری وی روی دینام، پیش از آغاز بررسیهایش درباره انتقال جریان، بود. هر دو القاگیر بر یک محور جاسازی شده بودند و فرجه بین آنها برابر ۹۰ درجه بود.

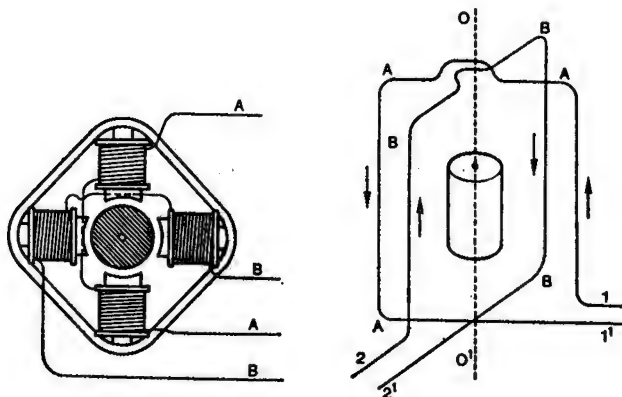
آقای دپره نفهمید که دستگاه وی نسبت به دستگاه بیلی متأخر است و شکی نیست که توجهی به دستگاه بیلی نکرده بود. کمی بعد، به سال ۱۸۸۳ فرضیه مهمی را درباره ایجاد یک میدان مغناطیسی واقعی گردان با ترکیب دو جریان متناوبی که یک ربع دور از یکدیگر فاصله

داشتند پایه گذارد. سرعت گردش برای هر تناوب جریان متناوب، یک دور بود. گرچه مفهوم میدان گردان سرانجام مشخص شد، دیده می‌شود که از زمان آراگو تا دپره این حرکت تا چه اندازه تصادفی بوده است. شگفتی آور است که این پژوهش‌گر که دستاوردهایش استثنایی بود و در همان زمان شرایط انتقال جریان مستقیم را مشخص ساخت از این اطلاعات تازه به سود جریان متناوب بهره‌ای برنداشت. شکی نیست که این اندیشه هنوز ناپخته بود. آلترناتور مصرف چندانی نداشت و ترانسفورماتور استاتیک آقایان گولار و گیسی تا سال ۱۸۸۳ طرح دقیقی نداشت (برای توضیح بیشتر به صفحه ۴۸۲ مراجعه شود).

پژوهشهایی دربارهٔ موتورهای ناهمزمان با میدان گردان: نخستین موتورهای با میدان گردان، تنها دو سال بعد، در ۱۸۸۵ با دسته‌های گالیلئو فراری، که بی‌شبهه از اندیشه‌های آقایان بیلی و دپره آگاه نبود ساخته شد. اما فراری از ترانسفورماتور گولار اطلاع داشت و طرح ایجاد زاویهٔ قائمه بین قرقرهٔ تخت و تغذیهٔ قرقرهٔ نخست (که با سیمهای ضخیمی ساخته شده بود) با جریان سیم‌پیچ ورودی ترانسفورماتور، و قرقرهٔ دوم (که با سیمهای نازکی ساخته شده بود) با جریان خروجی همان ترانسفورماتور را از ترانسفورماتور گولار اقتباس کرده بود. استوانه‌ای در محور این بازوی عرضی آویزان بود. فراری اظهار داشت که چنانچه تنها یک قرقره تغذیه شود سیلندر بی‌حرکت می‌ماند. اما زمانی که هر دو قرقره همزمان تغذیه شوند سیلندر حول محور عمودی خود خواهد گردید.

فراری که از این آزمایش درس گرفته بود موتور کوچکی ساخت که چهار قرقرهٔ آن به صورت قابی دیسک مسین را احاطه کرده بودند. هر دو جفت قرقره‌ها مقابل هم بودند و هرکدام تبدیل به یک مغناطیس برقی، با جریانهای متناوب دارای اختلاف فاز بین خود، تغذیه می‌شدند (شکل ۵۱). در این شرایط جریانهای القاگیر در دیسک سبب گردش آن حول مرکز می‌شوند. این دستگاه تا سال ۱۸۸۸ ارائه نشد و خود موتور آن در نمایشگاه سال ۱۸۹۳ شیکاگو برای نخستین بار در معرض تماشا گذارده شد و حال آنکه نمایش تاریخی انتقال برق چند فاز در نمایشگاه فرانکفورت در سال ۱۸۹۱ انجام گرفته بود.

بالین حال، آقای فراری برخلاف آقای دپره این راه را ادامه داد. وی ساختمان موتورهای جدیدی را بررسی کرد و مفهوم «لغزیدن» را روشن ساخت که به معنی تفاوت سرعت زاویه‌ای روتور با سرعت میدان مغناطیسی است که برای پدید آمدن جریانهای القاگیر در اولی ضروری است. وی نشان داد که توان یک موتور ناهمزمان تابعی از سرعت گردش و لغزیدن است. او نظریهٔ خود را در ۱۸۹۴ یعنی زمانی اعلام داشت، که نظرات ریاضی موتورهای القایی با کوششهای فیزیکدانان



شکل ۵۱. اصول موتور ناهمزمان با میدان گردان، ساخت فراری.

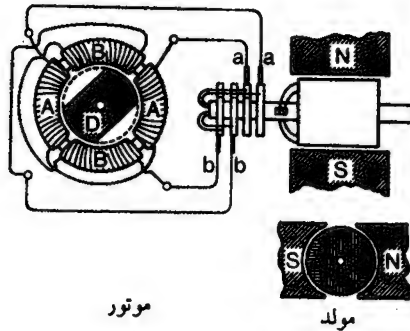
سمت چپ: موتور سال ۱۸۸۵. دو جفت الکترو دبا سر مشترک که جریانهای متناوب دو فازی با فاصله ربع تناوب آنها را تغذیه می‌کند. دیسک مرکزی حول محور خود می‌گردد.

سمت راست: نمایه دستگاه دیگری که در همین زمان ساخته شده است. قرقره تخت AA جریان ورودی یک ترانسفورماتور را دریافت می‌کند. قرقره BB که از سیمهای نازکی است جریان خروجی را دریافت می‌کند. تحت تأثیر تنها یک جریان، سیلندر بی حرکت است و در اثر دو جریان، حول محور خود می‌گردد.

همه کشورها به پیشرفتی دست یافته بود.

کاربرد جریانهای چند فازی: خط مهم دیگری از پژوهشها، تقریباً در همان زمان کارهای فراری، بوسیله آقای نیکلا تسلا، فیزیکدانی از تبار کروات اما مقیم ممالک متحده امریکا، گشایش یافت. آقای چارلز س. برادلی امریکایی کمی پیش از او، بین سالهای ۱۸۸۷ تا ۱۸۸۹ اختراعات زیادی به نام خود به ثبت رسانیده بود که از آن میان اصول یک موتور چند فازی و مفهوم لغزش مغناطیس بود. آلترناتور با حلقه گرام ساخته آقای برادلی، جریان دو فازی تولید می‌کرد و برگشت پذیر بود. اما از میدان گردان در آن سخنی نرفته است و بخوبی نمایان است که برادلی در نظر داشته است که توان یک ماشین گرام را افزایش دهد تا اینکه میدان تحقیق تازه ای باز کند. علاوه بر این، آلترناتور وی نمی‌توانست در نقش موتور کار کند.

ساخته های آقای تسلا از نوع دیگری بود. در ماه مه ۱۸۸۸ امتیازهای متعددی که از حدود شش ماه پیش به ثبت رسیده بودند بوسیله پاتنت آفیس<sup>۱</sup> انتشار یافتند. مشخصات اساسی مربوط



شکل ۵۲. موتور تسلا با میدان گردان.

استاتور این موتور از دو مدار جدا از هم تشکیل شده است که مستقیماً به مدارهای روتور یک آلترناتور تولیدکننده جریان دو فازی، وصل شده‌اند. در پایین، سمت راست شکل ضربدری حلقه‌های القاگیر، هر یک مجهز به دو قرقره دیده می‌شود. روتور این موتور یک دیسک از آهن (D) است.

به وسایل گرداندن القاگیر به توسط جریان القایی است. در یکی از این امتیازها بویژه آلترناتوری دو فازی شرح داده می‌شود. که بدون هیچ واسطه‌ای، دستگاه قرقره‌های متقارن یک موتور دو فازی را تغذیه می‌کند که روتور آن یک دیسک مسی است (شکل ۵۲). تسلا همچنین سیستمی مشابه سه فازی، مولد و موتور، را طرح کرد که آنها را علی‌البدل یکدیگر نامید.

چند ماه بعد، در نوامبر همان سال، موتوری ساخت که روتور آن بوبینی، و سیم‌پیچی ثانوی روی آن بسته شده بود. این یک موتور القایی کامل بود که تسلا در آن جریانهای متناوب حقیقی، نه جریانهای موج واره را به‌کار گرفته بود.

به دنبال این انتشارات، هر تکنیک تازه برای افزایش قدرت می‌کوشید. در آنها طرح موتورهای دوفازی و سه فازی، همزمان و ناهمزمان، با خطوط تغذیه دو فازی چهارکابلی و سه فازی شش کابلی دیده می‌شود، و باز در همانها امکان ساخت جریان دوفازی با سه کابل همراه و یک کابل مشترک برگشت جریان، و بالاخره امکان معکوس کردن جهت گردش با تغییر ترتیب فازها وجود داشت.

آقای تسلا در سال ۱۸۸۹ پژوهشهای خود را درباره راه‌اندازی موتورهای همزمان دوفازی با «ایجاد فازها» منتشر کرد، بدین معنی که بوسیله جریان متناوب، گردش میدان بتدریج زیاد می‌شود تا به رژیم معمول آن برسد، و طی این جریان، تناوب منظم قطبها حفظ می‌شود. وی در سالهای بعد اشکال گوناگون موتورها را بررسی کرد تا در سال ۱۸۹۱ به موتور شش قطبی دست یافت که

در آن، ایجاد فازهای مصنوعی بوسیله تنها بازی قرقرها و نیز خازنی که یک سیم پیچ ثانوی آن را تحریک می کرد، عملی می شد.

اختراعات تسلا، شرکت وستینگهاوس را موفق ساخت.

طی این سالهای سرنوشت ساز، شمار فیزیکدانان و تکنسین هایی که در کار به خدمت گرفتن جریانهای متناوب بودند فزونی می یافت. دستاوردهای آنها متفاوت بودند و در مجموع، آزادی وسیعی برای انتخاب ایجاد شده بود که پیوسته متمرکزتر می شد. تحلیل بسیار اصیلی از آقای هازل واندرا<sup>۱</sup> از اهالی بادن<sup>۲</sup> آلمان درباره طرز تغذیه یک موتور بوسیله جریان مستقیم یک دینام، در سال ۱۸۸۷، چگونگی پدیده هایی را که در هر ماشین رخ می دهد به شکل گیری شرح می دهد.

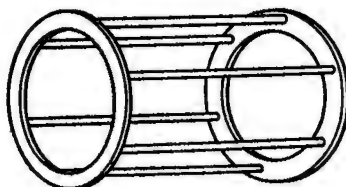
استدلال آقای هازل واندرا چنین بود: در القاگیر یک دینام، جریان متناوب چند فازی تولید می شود که کموتاتور آن را به جریان مستقیمی، که در واقع ادامه بسیار نزدیک جریان دارای همان جهت است، تبدیل می کند. این پدیده در ورود به دستگاه، حالت معکوس دارد؛ جریان مستقیم موجواره ای که انتقال یافته است به توسط کموتاتور گیرنده، به ردیفی از جریانهای متناوب، تجزیه می شود. از این مقدمه، نتیجه می گیریم که پیچیده کردن ماشینها کار بیهوده ای است و انتقال جریانهای متناوب بدون تغییر دادن شکل آنها ساده تر است. این استدلال گویا برای معاصران وی بسیار عجیب بوده است. آقای هازل واندرا ماشینی با جریان سه فازی ساخت که یک القاگیر حلقوی و دوازده قرقره داشت که در سه مدار دسته بندی شده بودند و یک القاگر متحرک، که در وسط قطب قرار می گرفت. یک کلکتور ثانوی القاگر را تحریک می کرد. این ماشین که در نقش موتور کار می کرد و در نمایشگاه سال ۱۸۹۱ فرانکفورت به نمایش گذارده شد، نه تنها به علت طرز ساخت آن که از حد تکنیک متحول آن روز بسیار پیشرفته تر بود، تاریخی شد، بلکه بدین علت هم که یک قدرت پژوهشی را نشان می داد که برای تثبیت خود از پای نمی نشست.

مرحله پایانی این دوره همکاری را آقای فون دالیوو- دابراوولسکی سرمهندس مؤسسه مهم آلمگامینه الکتریسیته گزلسافت<sup>۳</sup> آلمان کامل کرد. وی با دنبال کردن پژوهشهای فزاری و تسلا، ضمناً در دو سال ۱۸۸۹ و ۱۸۹۰ بررسی کاملی از ترانسفورماتورهای سه فازی و استفاده از یک سیم برگشتی مشترک در سه مدار به عمل آورد. این پژوهشها اساساً راه حل انتقال نیرو به کمک جریانهای متناوب را به دست دادند.

1. Haselwander

۲. Baden: سرزمینی در جنوب غربی کشور آلمان، در سمت راست رودخانه راین قرار دارد. - م.

3. Allgemeine Electricität Gesellschaft



شکل ۵۳. نمایه یک روتور قفسی یک موتور چند فازی با میدان گردان.

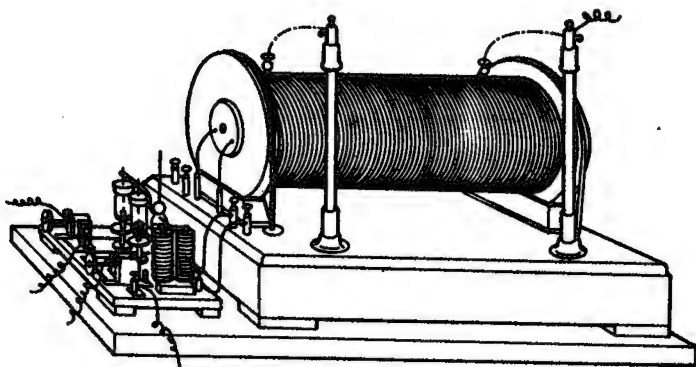
وی همچنین به مسأله اشکال عملی مناسب برای قطعات گردنده موتور فراری نیز توجه داشت، و بر آن شد که سیستم قرقره روتور آن را با مکانیسمی از میله‌ها یا نوارهای مسی که با فواصلی روی دوره استوانه قرار داده می‌شدند و ایجاد اتصال کوتاه بین آنها بوسیله رساناهایی که در دو سر هر یک جوش داده می‌شدند، تعویض کند. از جمله ترتیبات گوناگونی که اندیشیده بود یکی به طور کلی مورد قبول قرار گرفت و مناسب شکل ظاهریش، به قفسی شهرت یافت (شکل ۵۳).

وی در جریان پژوهشهایش، روتورهای متورق سیم‌پیچی شده با قرقره‌های عایق شده ساخت و از مقاومتهای مایع استفاده کرد که آنها را با اتصال ستاره، روی ثانوی متحرک، برای راه‌اندازی نصب می‌نمود.

محقق است که دستاوردهای دالیوو-دابراوولسکی آخرین نقطه تحول مجموعه همه این دشواریها نیست بلکه آنها مرحله‌ای را مشخص می‌کنند که با نمایشگاه سال ۱۸۹۱ فرانکفورت، پایان پرشکوهی داشته است.

انتقال جریان متناوب: ژنراتورها و موتورهای دینامی، در دوانتهای این خط، می‌توانستند دستگاههای کارایی برای صنعتی کردن جریان متناوب باشند. با این حال، خود مسأله انتقال این جریان به فواصل دور، که در آن زمان تنها برای صد یا دویست کیلومتر مطرح بود، از نظر اقتصادی تنها زمانی می‌توانست پیش کشیده شود که وسایل فنی برای انتقال جریان با فشار قوی در دسترس باشد. برای اینکه به چندین ده هزار ولت دست یابند نمی‌توانستند بر یک ردیف ژنراتورهای به‌طور زنجیری با یکدیگر دوه‌دو اتصال داشتند و جریان خود را مستقیماً تحویل خط می‌دادند تکیه کنند.

محقق است که آقای توری برای انتقال جریان مستقیم چنین سیستمی ساخته بود. در این سیستم در محل تولید جریان، دینامهای متعددی به‌طور زنجیری به یکدیگر وصل شده بودند. در مقصد نیز از گروه‌های موتور-مولدهایی استفاده می‌شد که آنها هم برای کاهش فشار، به‌طور زنجیری با یکدیگر مربوط می‌شدند. هر دینام پایانی، جریانی با ولتاژ قابل استفاده، مثلاً برای روشنایی،



شکل ۵۴. قرقره القای به اصطلاح رومکورف (حدود ۱۸۵۰).

در بیرون شکل، سیم پیچی ورودی با سیم ضخیم دیده می شود؛ در وسط، دنباله قرقره خروجی است. در سمت چپ تصویر، لرزنده نشان داده شده است.

تحويل می داد.

به کارگیری این روش برای جریان متناوب دشوار بود. برای ایجاد اتصال زنجیری آلترناتورها می بایست با فرکانسهای یکسان و همراه فاز عمل کرد. دشواری این کار سبب شد که کاربرد جریان متناوب به مدت پانزده سال به تعویق افتد. در حالت عکس، گرچه بررسی و پیشرفت دستگاههای چند فازي با جهشهایی انجام شد، این بخاطر راه حل ساده و مؤثری بود که بین سالهای ۱۸۸۲ - ۱۸۸۴ یافت شد. این راه حل همانا موتورهای استاتیکی بود که در ابتدا مولدهای ثانوی نامیده می شدند اما پس از زمان کوتاهی آنها را ترانسفورماتور نامیدند.

مولدهای ثانوی: این مولد، دستگاه جدیدی نبود؛ تقلیدی از قرقره القای آقایان ماسون<sup>۱</sup> و برگه بود که به قرقره رومکورف شهرت داشت، زیرا این ابزار ساز پرآوازه، پس از تکمیل، آن را در کاتالوگ خود گذاشته بود (شکل ۵۴). این قرقره که در جریان مستقیم (تنها جریان آن زمان) به کار می رفت لرزنده ای داشت که جریان برق ورودی را مکرراً قطع و وصل می کرد، و این به معنای تغییرات میدان مغناطیسی و در نتیجه القای جریانی با ولتاژ بسیار بالا در خروجی ترانسفورماتور بود. هر دو سیم پیچی که دقیقاً عایق شده بودند یک هسته مغناطیسی را احاطه می کردند. ورودی، سیم پیچ ضخیمی بود که بیش از چند دور نداشت؛ خروجی، با سیم نازکی تهیه شده بود و تعداد زیادی دور داشت. جریان القایی، قدرت بسیار کم اما ولتاژ بسیار بالایی داشت.

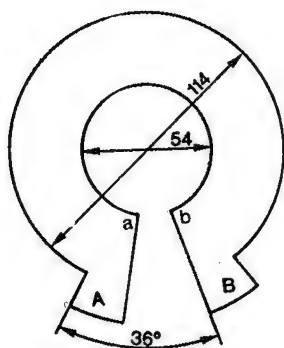


قرقره رومکورف تا آن زمان یک وسیله آزمایشگاهی بود که کاربرد آن در رشته‌هایی نظیر کارهای عمومی، معادن و ارتش روبه افزایش داشت. در سالهای ۱۸۶۰ آقای لتوار از آن برای تأمین اشتعال مدل‌های نخستین موتورگازی خود بهره گرفته بود. اینکه الکتریسین‌ها آن را هنوز در فهرست وسایل خود نگنجانیده بودند بدین دلیل است که این وسیله برای آنها، در دخل و تصرف در جریان مستقیم، کارایی چندانی نداشت. اما آنان بزودی دریافتند که در دستکاری جریان متناوب، قرقره رومکورف کمک خواهد بود. وسیله لرزنده بیهوده ماند زیرا خود شکل جریانی که از سیم‌پیچ ورودی می‌گذشت سبب تغییر میدان می‌شد. بدین ترتیب، مجموعه بسیار ساده‌ای در اختیار آنها بود که از دو دستگاه قرقره محیط بر یک هسته از ورق آهن تشکیل می‌شد و هیچ قطعه متحرکی نداشت و ولتاژ، به تناسب تعداد دورهای این دو به یکدیگر افزایش می‌یافت. ثابت تقارن، که همچون دیگر ماشینهای برقی عمل می‌کرد، می‌توانست برای رساندن ولتاژ از مقدار مورد انتقال به ولتاژ مناسب دستگاه به‌کار گرفته شود.

این طرح جدید انتقال، بسیار ساده بود. با این همه، تنها در زمینه کاربردی جریانهای متناوب می‌توانست عملی شود. اما تیزیینی آقایان لوسین گولار و جان دیکسون گیس سبب شد که درست در زمانی که رفته‌رفته نیاز به آن احساس می‌شد بدین راه حل توجه کنند. از نظر مصالح کاری، روشن نبود که این راه حل، مناسبترین است و یا حتی عملی است یا نه. همه پدیده‌های پارازیتی که کاربرد آن را پوچ می‌کردند نادیده گرفته شده بودند؛ تلفات مغناطیسی؛ تلفات ناشی از گرم شدن؛ نوع هسته؛ هیأت سیم‌پیچ که آنها هم مشکلاتی، گرچه جزئی بودند؛ اما می‌بایست با آزمایشها برطرف شوند زیرا دانش نظری در این رشته هنوز ضعیف بود.

دو همکار فوق کار خود را در این زمینه در سال ۱۸۸۲ آغاز کردند. هدف آنها امکان تغذیه خطوط طویل روشنایی با برق یعنی خطوطی بود که برای نخستین متری لندن به ۲۵ کیلومتر بالغ می‌شد و چهار ایستگاه فرعی آن شمعهای قوسی یابلوچکوف و ۱۴۰ لامپ روشنایی سوان را روشن می‌کردند و بر رویهم می‌بایست ۱۳۰ اسب نیرو توزیع می‌شد. عنوان اختراع ثبت شده ۷ اکتبر ۱۸۸۲ آنها ضمناً بسیار گویا بود. این اختراع، سیستمی برای انتقال نیروی برق به فواصل دور بود. در این مورد انتقال می‌بایست با ۳۰۰۰ ولت انجام گیرد که یک «مولد اصلی» آن را تأمین می‌کرد.

در هر نقطه کاربرد، یک «مولد فرعی» ولتاژ را برای تغذیه لامپها به ۱۰۰ ولت پایین می‌آورد.



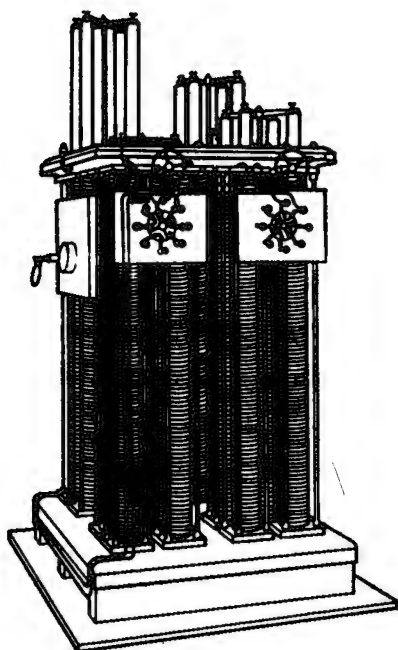
شکل ۵۵. نمایه ترانسفورماتور گولار-گیس.

این ترانسفورماتور از ترکیب قطعات زیر: زبانه A یکی که به زبانه B دیگری اتصال یافته است. دو پروانه که بدین ترتیب پیرامون یک هسته تشکیل شده اند یکی با ماده عایق واسطه، در دیگری جا گرفته است.

نمایشگاه برقی تورینو: آقای گولار از فرصت نمایشگاه برقی تورینو (سال ۱۸۸۴) برای ارائه دستگاه خود به مردم استفاده کرد. دستگاه وی با حوادث متعددی روبه رو شد که برخاسته از سستی مصالح در دسترس وی بود. وی که فاقد اعتبار مالی بود ناگزیر از اوراق کردن وسایل لندن برای حمل به تورینو و آماده سازی ۸۰ کیلومتر سیم مسی بود که در لحظات آخر به وی رسید، و غیره. وانگهی بیماری وبا که در تورینو بیداد می کرد نیز بر مشکلات دسترسی به مصالح و کارکنان پیش بینی ناشدنی می افزود. همه کارهای هیئت داوران با عجله در دو روز پایانی نمایشگاه انجام گرفت، زیرا به علت همه گیری و با ناچار از تعطیل هرچه زودتر نمایشگاه شدند. با این همه آقای گولار، در لحظه واقعاً واپسین، توانست فاصله ۴۰ کیلومتری نمایشگاه تا سالن ضیافت پایان آن را با برق روشن سازد.

این وسایل اولیه برای قدرت یک تا یک و نیم اسب طراحی شده بودند. هر دو سیم پیچ دور هسته ای عمودی، که دسته ای از سیم های آهنی بود، پشت سر هم پیچیده شده بودند. سیم پیچها از ردیف حلقه های باز و تخت مسی تشکیل می شدند که هر سر آنها به یک چنگک خمیده وصل شده بود تا بتوان حلقه ها را دو به دو با یکدیگر متصل ساخت (شکل ۵۵). عایق سازی آنها با حلقه های مقوایی پوشیده از لاک انجام گرفته بود. این حلقه ها در فواصل قطعات مسی و بوسیله لوله ای از ابونیت که هسته مغناطیسی را در خود می گرفت جاگذاری شده بودند.

چهار ستون مشابه روی سکویی چوبی گذاشته شده بود و در صورت نیاز می توانستند به طور



شکل ۵۶. ترانسفورماتور گولار-گیس.

قطعات روی هم چیده (شکل ۵۵) روی لوله‌ای از ابونیت سوار شده‌اند. هسته‌ای استوانه‌ای شکل از سیمهای آهنی، درون این لوله می‌لغزد. در شکل دیده می‌شود که این مفتولها کم و بیش فرو رفته‌اند تا توان ترانسفورماتور تنظیم باشد، چرخهای حرکت و روستاهای تنظیم نیز در شکل نمایانده شده‌اند.

زنجیری یا موازی با یکدیگر اتصال یابند. قدرت دستگاه با فرو بردن کم و بیش هسته‌ها در لوله ابونیتی آنها، بوسیله یک سیستم پیچ و مهره تغییر می‌کند. سرانجام روستایی که به سیم پیچ ورودی متصل بود، تغییر دادن ولتاژ را ممکن می‌ساخت (شکل ۵۶).

مقدار نشت مغناطیس از چنین هسته‌های راست گوشه‌ای چشمگیر بود؛ باین همه بازده دستگاه بین ۹۰ تا ۹۵٪ تثبیت شده بود. این نمایش با رفع آن همه دشواریهایی که با آنها برخورد داشت برای خود گولار یک پیروزی بود، گرچه انگیزه گفت وگوهای فراوانی شد.

برای اینکه اهمیت این عمل را ارزیابی کنیم باید به یادآوریم که در همان اوان کارهای بسیار نمایشی آقای دپره درباره انتقال جریان مستقیم مطرح بود. برای کوتاه کردن خط آزمایشی میان

پاریس و کريل، نقطه‌ای با فاصله رفت و برگشتی دقیقاً ۸۰ کیلومتر از تورینو انتخاب شد. محافل الکتریسیته‌ها در تمام مدت این سالهای شکوفا در تب و تاب بودند و نمایشگاهها محل رقابتهای تنگاتنگ.

نتایج نمایش گولار و بویژه ساختمان مولدهای فرعی وی و نیز بازده سنجیده دستگاهش اعتراضهایی نیز به دنبال داشت. گولار با مخالفان خود با همان سرسختی می‌جنگید که با دشمنان مادی خود. شدت این نبرد برای وی حیاتی بود و وی را در جریان یک بیماری مغزی به کوری و سپس در ۱۸۸۸ به مرگ کشانید.

کاملاً نمایان است که شخصیت گولار را می‌توان از نظر عصبانیت و تحریک‌پذیری شدید و نیز از نظر اطلاعات علمی و قدرت فنی با گرام مقایسه کرد. گولار هم مانند گرام، در جهت حل مسائل نسبتاً ساده‌ای که در محافل فنی مورد بحث و امان نظر بودند، تیزبینی خاصی داشت؛ وی که بی‌درنگ وارد میدان عمل شد، در لندن با گیس یک شرکت صنعتی با نام National Society for the Distribution of Electricity by Secondary Generators تأسیس کرد و اینکه وی شخصاً به موفقیت‌های درخشانی، مانند گرام دست نیافت بدین علت بود که عوامل گوناگونی تا حدودی سد کارهای وی شدند.

بررسیهای نظری گفت‌وگوها: نمایش ژنراتورهای فرعی گولار در تورینو، با همه اعتراضهایی که برانگیخت، کاری سرنوشت‌ساز بود. در واقع، گالیلئو فراری توانست مدت چهار روز روی آنها شخصاً آزمایش کند. وی بدین دستگاه احاطه یافت و چند ماه بعد، در فوریه ۱۸۸۵ یادداشت طولی انتشار داد و در آن، نخست یک بررسی نظری از ترانسفورماتورها کرده بود که نخستین کار در این باره به‌شمار می‌رود. او در این یادداشت انواع پدیده‌هایی را که در ترانسفورماتور رخ می‌دهند و تأثیر عوامل گوناگون نظیر سیستم سیم‌پیچها، ساختمان و مقاومت هسته‌ها را مشخص می‌ساخت و نیز نشان می‌داد که چگونه مشخصات آنها را می‌توان محاسبه کرد. وی علاوه بر آن، نتیجه خاص خود را به میان گذاشت و نشان داد که اندازه‌گیری‌هایی که به کمک الکترومتر یا الکترودینامومتر به دست آمده‌اند، کمی عجولانه انجام شده‌اند و برای مقادیر گوناگون تحقیق شده ارقامی می‌دهند که با ارقامی که با روش کالری‌سنجی خود به دست آورده است نمی‌خواند. او یادداشتهای خود را به نکته‌ای درباره اصلاح ساختمان هسته‌ها پایان می‌دهد - اصلاحی که گولار برای بهتر کردن بازده، آن را انجام داد. آقای گولار به جای یک دسته سیمهای آهنی، یک کنده چوبی استوانه‌ای که تنها با سیمهای آهنی پوشیده شده بود به کار گرفت تا جریانهای فوکو را کاهش دهد. آقای فراری ادعا کرد

که گولار با این تعویض «دستگاه خود را محسوساً خراب کرده است».

سرانجام، کار دیرپای آقای فراری و همه گفت‌وگوهایی که پیرامون اختراع گولار دور می‌زدند با پیروزی این اختراع پایان پذیرفت. در سال ۱۸۸۳ مجله *Electrical Review* در یک مجادله به سود پیشگامی آقای فولر فیزیکدان رأی داد که در سال ۱۸۷۹ نوعی ترانسفورماتور طرح کرده بود که بر همان پایه قرار داشت. باین‌حال، روشن است که گولار و گیپس نخستین کسانی بودند که توانستند برای صنعت این دستگاه را بسازند.

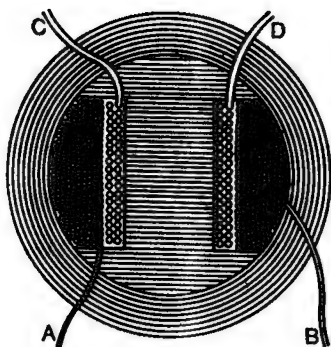
آقای فراری در یادداشت‌هایش بین مولدهای فرعی گولار و ترانسفورماتورها مقایسه‌ای کرده است. اصطلاح ترانسفورماتور در سال ۱۸۸۵ به توسط سه فیزیکدان با نامهای زیپرنوفسکی<sup>۱</sup>، دری<sup>۲</sup> و بلائی<sup>۳</sup> با مباحثات وضع شده بود. ساختمان این ترانسفورماتورها دقیقاً برعکس ساختمانی بود که گولار عمل می‌کرد. دستگاههای بوبینی مدارهای اولیه و ثانوی حلقوی شکل بودند و مدار مغناطیسی که جانشین هسته شده بود سیم‌پیچی از آهن بود که از درون به بیرون حلقه راه می‌یافت. ترتیب میدان مغناطیس بسته را آقایان بلائی به خود نسبت داده بود، اما گولار نه‌تنها با این ادعا - با مراجعه به فولر - مخالفت ورزید بلکه کارایی آن را نیز نمی‌پذیرفت.

تکامل ترانسفورماتورها: مرگ گولارگویا به همه این گفت‌وگوها پایان داد و دستگاه ترانسفورماتور راه تکامل می‌سپرد گرچه به‌شکل قطعی خود دست نیافت. هسته آن از ورقهای آهن نرم ساخته شده بود و شکل آن به سلیقه سازنده آن بستگی داشت. آقایان دیک<sup>۴</sup> و کندی<sup>۵</sup> شکل H را که تقلیدی از القاگیر ماکویی زمینس بود پذیرفتند (شکل ۵۷). آقای فراننتی برای نخستین بار نوعی اختلاط ورقهای آهن را که درون دستگاههای استوانه‌ای قرقره‌ها قرار می‌داد به کار برد و بنابراین، دنباله‌های آنها دور خود آنها برگشته می‌شد. شرکت امریکایی وستینگهاوس با خریدن امتیاز اختراع گولار و گیپس، نخستین مؤسسه‌ای بود که ترانسفورماتورهای جوشدار ساخت. این دستگاهها از صفحاتی تشکیل می‌شدند که به‌شکل چهارگوش بریده شده بودند و دو سوراخ مربعی در آنها ایجاد می‌کردند تا قرقره‌های ورودی و خروجی در میان آنها پیچیده شوند.

پس از گذشت مدت اندکی، دستگاه ترانسفورماتور با شکلهای گوناگون به‌طور مؤثری رایج شد. در حوالی سالهای ۱۸۸۵ شبکه‌های متعدد توزیع، فعال شدند جریان برق عموماً بوسیله آلترناتوری مستقیماً با ۲۵۰۰ ولت تولید می‌شد و ترانسفورماتورها برای پایین آوردن ولتاژ به‌کار گرفته می‌شدند.

۱. Zipernowsky، کارولی (۱۸۵۳ - ۱۹۴۲): مهندس مجارستانی برق.

2. Max Déri 3. Otto Titus Blathy 4. Dick 5. Kennedy



شکل ۵۷. مقطع افقی ترانسفورماتور دیک - کندی.

هسته به شکل I است، مانند القاگیر ماکویی زیرمنس. سیم CD که در داخل پیچیده شده است، مدار القاگیر را تشکیل می دهد؛ سیم پیچی AB، مدار القاگر است. یک سیم پیچی دایره ای از آهن ستر، مدار مغناطیس را کامل می کند.

احتمالاً برای نخستین بار بمناسبت نمایش بزرگ تاریخی سال ۱۸۹۱ بود که در پست مبدأ، ولتاژ را بالا (۸۵۰۰) بردند سپس در پشت مقصد آن را پایین آوردند. اما در آن هنگام دستکاری جریان سه فازی مطرح بود. در آن زمان از جمع کردن سه ستون تک فاز، که تا آن موقع به کار گرفته می شدند، در یک دستگاه برای تشکیل یک ترانسفورماتور سه فاز آگاهی داشتند. انواع متعددی تقریباً در یک زمان بوسیله سازندگان مختلف به آزمایش آورده شدند. شرکت وستینگهاوس این سه ستون را در یک خط قرار داد. در سال ۱۸۹۱ برای نمایشگاه فرانکفورت آنچه که به کار برده شدند تولید کارگاههای AEG آریکون بودند. این دستگاهها دوفاز، و اتصال ستاره ای داشتند. روش غوطه ور کردن در روغن برای عایق سازی مطمئن در آن زمان رسم شده بود.

این تکمیل پایانی به مکانیسمی غیر حرفه ای به نام جان نسبت داده می شود، که در سال ۱۸۵۴ یک بوبین القایی را در ترابانتین داغ فرو برد. سازندگان سالهای ۹۰ همه این روشها را با استفاده از روغن معدنی به کار می بردند. ترانسفورماتورها، که بخوبی خشک شده بودند در تشتی پر از روغن جوشان قرار داده می شدند. روغن را باز هم در تشت می جوشانیدند تا آخرین حباب هوای محبوس در آن خارج شود.

در ادامه این تحولات و حدود یک ربع سده، تکنیکهای ساخت ترانسفورماتورهای استاتیک

تحول چندانی نداشتند. سیمهای قرقره‌ها را با چندین لایه نخ پیچیده شده روی آنها، عایق می‌کردند. قرقره‌ها را به شکل کلوچه‌ای می‌ساختند آنها را در روغنهای عایق فرو می‌بردند و دور هسته‌ها، به ترتیب یک در میان ولتاژ بالا و پایین، می‌چیدند. خود این هسته‌ها با فراورده‌های میکایی عایق می‌شدند. این فراورده‌ها در صنعت به شکلهای گوناگون برای کاربردهای مختلف ساخته می‌شدند. برش ورقهای هسته‌ها طوری انجام می‌گرفت تا جریان هوای خنک‌کننده در موردی که ترانسفورماتورها در روغن غوطه‌ور نیستند تأمین شده باشد. ساختمان این دستگاهها چنین بود؛ دستگاههایی که بعداً انتقال برق با فشار ۱۵، ۲۰ و حتی ۲۶ هزار ولت را تأمین کردند و با ابعاد بزرگی ساخته می‌شدند.

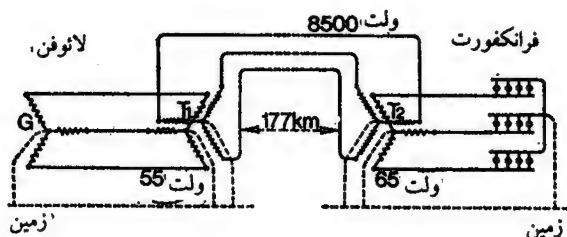
نمایشگاه لاتوفن - فرانکفورت: نمایشگاه سال ۱۸۹۱ در انحصار پیروزی همه پژوهشهایی بود که تنها در چند سال به تولید جریان چند فازی انجامیدند. تا آن زمان انتقال برق، مربوط به جریان مستقیم و برای روشن‌سازی بود و موتورهای با دپره، یا با جریان متناوب ساده برای روشن‌سازی، تنها باگولار. آنچه در سال ۱۸۹۱ اتفاق افتاد چهره‌ای تازه داشت: یک جریان متناوب چند فازی، که هم روشن‌سازی و هم توزیع نیروی محرکه را تأمین می‌کرد.

چنین نمایشی در فرصت نمایشگاه جهانی برق فرانکفورت کنار ماین اتفاق افتاد، - نمایشی که بویژه با ارائه فراورده‌های آلمان و سوئیس، مولدها و موتورهای دو یا سه فازی درخشید. این نمایشگاه تنها بدلیل بالا، نسبت به نمایشگاههای سالهای گذشته، تازگی داشته است. اما افزون بر آن، گروهی از مهندسان با همکاری چندین مؤسسه و ادارات دولتی، برقراری یک خط انتقال برق به طول ۱۷۷ کیلومتر، فاصله میان لاتوفن کنار رودخانه نکار<sup>۱</sup> و محل نمایشگاه در فرانکفورت را تأمین کردند. ابتکار این اقدام با آقای اوسکار فون میلر<sup>۲</sup> بود که بعدها *Deutsches Museum* مونیخ را تأسیس کرد و نیز در سال ۱۸۹۰ مأمور ایجاد یک کارخانه برق در لاتوفن برای روشن‌سازی شهر مجاور، هایلبرون<sup>۳</sup> شد. این طرح دقیقاً شامل تغذیه و روشن‌سازی شهر با جریان سه‌فاز بود. آنان فکر می‌کردند که بتوانند از وسایل فنی موجود، برای استفاده از انتقال برق با فشار قوی بوسیله جریان سه‌فاز به مسافت زیاد، بزرگترین کشف تا آن روزگار - و نیز از موتورهای با میدان گردان بهره گیرند (شکل ۵۸).

۱. Neckar: رودخانه‌ای در غرب آلمان به طول ۲۲۸ کیلومتر، از جنگلهای سیاه سرچشمه می‌گیرد و در ماینهیم به راین می‌پیوندد. - م.

2. Oscar von Miller

۳. Heilbronn: ناحیه‌ای در بادن - وورتمبرک، کنار رودخانه نکار، آلمان. - م.



شکل ۵۸. نمایه آزمایش انتقال برق سه فاز (۱۸۹۱).

G: مولد؛  $T_1$ : ترانسفورماتوری که ولتاژ را تا ۸۵۰۰ ولت بالا برده است؛  $T_2$ : ترانسفورماتوری که ولتاژ را تا ولتاژ کاری ۶۵ ولت پایین آورده است. تنها شبکه روشن سازی با موتور دینامی نشان داده است. موتور سه فاز، در شکل دیده نمی شود.

هر دو مولد را ارلیکون ساخت و طرح آن از آقای براون بود. ترانسفورماتورها، همان طور که دیدیم، به ترتیب ساخته ارلیکون و AEG، موتور از دالیو-دابرولسکی بود که در AEG ساخته شده بود. سرانجام در خط کردن آن با سیم مسی، که صنعتگری آن را آماده کرده بود، بوسیله سرویسهای پستی چهار دولت آلمان عملی شد. همه نمایشهای پیشین، چه کارهای دپره و چه کارهای گولار، در پرتو پشتیبانی مقامات دولتی یا نیمه دولتی انجام گرفته بود و این امر بخوبی نشان می دهد که توده مردم، محافل کارشناس و مقامات دولتی به پیشرفت صنعت برق علاقه داشتند. اما در نمایش لاتوفن-فرانکفورت بخوبی روشن است که همکاری در این راه باز هم کاملتر شده بود. این نمایش، مثل نمایشهای پیشین، اقدامی برای متقاعد کردن تماشاگران و گشودن راه یک صنعت نوین نبود. این نمایش، نتیجه نهایی پژوهشهای پایان پذیرفته شده، لااقل در این مرحله بود.

طبیعتاً سازندگان نتوانسته بودند آزمایشی را که مقدمات آن بخوبی چیده شده بود، کاملاً اداره کنند. به هنگام آماده سازی تا آغاز آزمایشها دلهره های متعددی احساس شد. سه سیم این خط را حدود ۳۰۰۰ دکل کوچک مسی نگهداشته بودند و تلفات انرژی در این دکلها معلوم نبود. ولتاژ انتقالی ۸۰۰۰ ولت- حداقل لازم برای داشتن ۶۰ اسب روی تلمبه هیدرولیکی که با موتور کار می کرد- و تغذیه ۱۰۰۰ لامپ روشنایی نیز ایجاد دلهره می کرد. عده ای از این می ترسیدند که بازده از ۵۰٪ پایینتر باشد که در چنین صورتی، آزمایش مورد داوری قرار نمی گرفت. اما در پایان، نتیجه کار موفقیت آمیز بود. بازده بین توربین لاتوفن و تلمبه فرانکفورت بین ۶۸/۵ تا ۲ و ۷۵٪ اندازه گیری شد.



اندازه‌گیری جالبی برای کاربردهای آینده به عمل آمد. با افزودن ترانسفورماتور دوم، در هر سر خط، فشار تا ۲۸۰۰۰ ولت بالا رفت و توانستند ادعا کنند که در فرکانس ۲۴ دور، قدرت ۱۸۰ اسب با بازده ۷۵٪ انتقال یافته است.

گرچه نمایشگاه فرانکفورت همه مسایل انتقال جریان متناوب با فشار زیاد را حل نکرد، ثابت کرد که برای این نوع کاربردها، همه شرایط فنی وجود دارد. در واقع این پیشرفت، گام به گام انجام گرفت و تنها پس از نخستین جنگ جهانی جهشهایی داشته است. در آغاز، پراتیک جریان مستقیم بر جریان متناوب برتری داشت، و، تنها در این دوره است که انتقال انرژی به شکل برق رفته رفته به یک عامل لازم و مهم برای صنعت، روشن سازی و کشش روی ریلها تبدیل می شود.

## کاربردهای بی‌درنگ جریان برق

تاکنون به مناسبتهای گوناگون گفته‌ایم که پیل‌های گالوانی برای طلاکاریهای صنعتی و نیز روشنایی با قوس برقی دو انگیزه اولیه برای تولید جریان برق بودند و آنها در موفقیت دینامهای اولیه، نخستین گام در گسترش سریعی از تجهیزات الکتروتنیکی، که مشکلات توزیع و مصرف را تغییر داد، تأثیر ویژه‌ای داشتند. باز باید به فرایند توسعه کاربرد برق صنعتی در ربع پایانی سده نوزدهم باز گردیم، در واقع بین گسترش مولدها و دورنماهای مصرف برق، نوعی روابط متقابل علت و معلول وجود داشته است که هرکس که بخواهد این مرحله نوآوری را بخوبی درک کند نمی‌تواند آن را نادیده گیرد. این مرحله در پایه‌گذاری ساختارهای تکنیکی، که تمدن صنعتی سده نوزدهم بر روی آنها بنا شد سهم بزرگی دارد.

انگیزه‌های مربوط به نیازمندیها و ساخت وسایل: سیمای این پدیده، یگانه نیست. دغدغه مصرف و ساخت وسایل نوین تولیدی، در همه این چرخه‌های تحول تکنیکی به چشم می‌خورد. اما این مناسبات غالباً به کندی انجام می‌گیرند. می‌توان با بررسی مراحل اختراع ماشین بخار پیستوندار اواخر سده هفدهم تا اوایل سده نوزدهم این ادعا را ثابت کرد. این دغدغه گاهی عامل اصلی اختراع

است و ماشینی شدن صنعت نساجی مثالی از این ادعاست. نیازمندی‌هایی که زائیده فشارهای اقتصادی جدید بودند با لختی زیاد به همت مخترعان وسایل فنی برآورده شدند. سرانجام، اینکه توان آفرینش و دامنه کاربرد وسایل نیز غالباً افزایش کندی داشته‌اند و نوآوری بابطوء کمال یافته است. این خصلت در تکمیل موتورهای درونسوز دیده می‌شود. در این زمینه گرایش به آفریدن، سرعت خود را نشان داد اما طی نیم سده پیشرفت آن آهسته بود و در آخر، زمانی که توان اختراع پدیدار شد نیاز به کاربرد آن چندان زیاد نبود. موتورهای گازی صنعتی با تردید بسیار به کار گرفته شدند و تنها با گذشت نیم سده از ساخت نمونه‌های اولیه بود که این وسیله جدید به مرحله فعالیت از کاربرد در همه زمینه‌ها، گام نهاد.

اما الکترونیک صنعتی، برعکس، به علت اینکه نیازمندی‌های کاربردی، به طور تقریباً پیوسته‌ای قدرت آفرینش را تحریک می‌کردند، سرعت به پیش رفت و آهنگ پیشرفت به مدت حدود سی سال، شاید بتوان گفت بدون وقفه، حفظ شد. جالبتر اینکه نیازمندی‌های بیان نشدند و احتمالاً پیش از آنکه امکان برآورده ساختن به وجود آید، نه احساس می‌شدند و نه بیان گردیدند. اما پس از پیدایش این امکانات، نیازمندی‌ها یکباره سرریز شدند و بی‌درنگ نقش انگیزشی خود را ایفا کردند. وانگهی این نیازمندی‌ها، همانند آنچه که در نیمه دوم سده بیستم اتفاق افتاد (اتومبیل، تلویزیون و وسایل ساخته شده از مواد سنتزی) ساختگی و بیهوده نبودند، و این امر در اوضاع و احوالی بود که محیط تکنیکی پروراننده آنها در آن زمان سطح بالایی داشت.

در واقع برق صنعتی از همان آغاز پیدایش، انگیزه ایجاد نوع تازه‌ای از اسکلت‌بندی تکنیکی شد که بعدها تمدن را به مرحله قطعی تحول تکنیکی وارد ساخت. گمان می‌رود که دست‌درکاران، از همان سال‌های نخستین بدین امر آگاهی داشتند یا لااقل کسانی که می‌توان آنها را تکنسین یا اقتصاددان حرفه‌ای این جهش دانست.

وانگهی به‌طوری که دیده خواهد شد، شیمی صنعتی و نیز متالورژی از رشته‌های نخست مورد علاقه مردم بودند، و روشن‌سازی و حمل‌ونقل دو صنعتی بودند که ردیف‌های بلافاصله پس از آنها را اشغال می‌کردند.

### روشن‌سازی با برق

داستان شمع‌های یابلوچکوف: لامپ‌های قوسی، همان‌طور که دیدیم، تنها برای روشنایی‌های استثنایی به کار می‌رفتند. شمع‌های یابلوچکوف نخستین وسیله روشن‌سازی دائمی خیابانها و پارک‌های ملی،

باغهای بزرگ، سوپرها، سالنهای ایستگاه، نمایشگاهها و سالنهای تئاتر بودند.

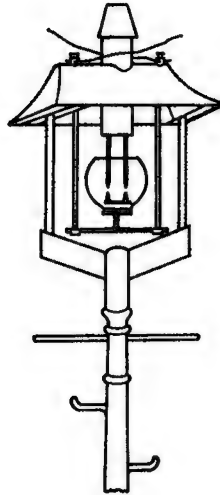
شمعهای یابلوچکوف از همان زمان پیدایش، اختراعی عالی ارزیابی شدند زیرا پیچیدگیهای مکانیکی رگولاتورهای آنها حذف شده بود. اما نواقص آنها پس از مدت کوتاهی آشکار شد. نخست، آنها می‌بایست با جریان متناوب تغذیه می‌شدند، و این در زمانی بود که تنها به جریان مستقیم توجه می‌شد. رگولاتورها با جریان مستقیم انطباق یافته بودند؛ زیرا آنها به‌طور مکانیکی اتلاف نابرابر دو میلهٔ زغالی را جبران می‌کردند. در شمعهای یابلوچکوف اتلاف دو میلهٔ زغالی باید برابر باشند، چون هیچ‌گونه جبرانی میسر نبود؛ بنابراین می‌بایست از جریان متناوب استفاده شود.

گفته شد که آقایان گرام و لونتس در چنین موقعیتی نخستین آلترناتورها را ساختند. اما، شبکه‌های توزیع محدودی مورد نظر بودند، و بعداً مسأله اقتصادی آنها مطرح شد. در سالهای ۸۰ و در آغاز ۱۸۸۹، که شبکه‌های توزیع برای شهر پاریس در حال پوشش سراسر این شهر بزرگ بودند و اکثراً این شبکه‌ها به یکدیگر متصل می‌شدند، شمعهای یابلوچکوف سریعاً از دور خارج شدند. آنها صرفاً به حادثه‌ای، نه بدون اهمیت، تبدیل شدند زیرا لاقفل، مجوزی برای طرح روشن‌سازی سراسری با برق بودند. اما این ادیسن بود که با همهٔ فکر و جسم خود وارد این میدان شد.

تحول لامپهای قوسی: لامپهای قوسی حتی زمانی که لامپهای التهای کنونی به‌وجود آمدن شبکه‌های سراسری توزیع را ممکن ساختند جای خود را در تجهیزات روشنایی عمومی نگذاشتند. لامپهای قوسی، همچنین تحولی کاملاً مهم در دهه‌های نخستین کاربرد سیستماتیک خود داشتند.

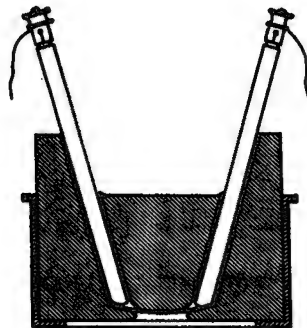
رتیبات گوناگونی برای این لامپها پیشنهاد شد و سرانجامهای مختلفی داشتند، ترتیباتی که حتی فهرست کردن آنها نیز ممکن نیست. در نمایشگاه برق سال ۱۸۸۲ انواع لامپهای قوسی به ۸۶ رسید. نوع بسیار رایجی از آن چارلز فرانسیس براش، ۱۸۷۸، بود که از آن سخن گفته‌ایم. در این نوع لامپ، زغال پایینی ثابت بود، اما زغال بالایی، بر اثر وزن خودش با مکانیسم بسیار پیچیده‌ای از ترمز و نوعی ناظم الکترومغناطیسی پایین می‌آمد (شکل ۵۹). لامپ براش، در هر سیستم تأسیسات برقی دارای مولد، و توزیعی شبیه گرام شرکت داشت. لامپ سولی<sup>۱</sup> (خورشیدی)، ۱۸۸۰ معاصران خود را خیره می‌کرد. دو میلهٔ کربنی در میان یک قطعهٔ آهنکی به‌سوی یکدیگر خم شده بودند و نور تند طلایی رنگی ایجاد می‌کردند و از این لحاظ، خورشیدی نام گرفتند (شکل ۶۰). بر پایه قضاوتی در همان دوره، لامپ خورشیدی همه نواقص شمع یابلوچکوف، پیش‌نمونه خود را، با خود داشت، اما مدتها در کار بود.

ساخت میله‌های زغالی، که گاهی آن را مدار ولتا یا مدار روشن می‌نامیدند، با روشهای گوناگونی



شکل ۵۹. لامپ براس؛ برای روشن‌سازی شهر نیویورک (۱۸۷۸).

انجام می‌گرفت. تراش زغال قرع، کار نسبتاً پرهزینه‌ای بود و بزودی بین سالهای ۱۸۷۵ - ۱۸۸۰ چندین دستور برای تهیه نوعی خمیر زغالی دارای قوام مناسب که هم با تراشیدن و هم در اثر روزنرانی شکل می‌گرفتند، پیشنهاد شد. روش اخیر را آقای فردینان کاره<sup>۱</sup> در سال ۱۸۷۶ به نام خود به ثبت رسانید و برادر وی ادمون آن را به‌کار گرفت. ترکیب، و نیز طرز روزنرانی<sup>۲</sup> این مخلوط،



شکل ۶۰. لامپ خورشیدی (۱۸۸۰).

پیوسته اصلاح می‌شد. سرعت روزنرانی این میله‌ها در سال ۱۸۹۰ به ۸ تا ۱۰ متر در دقیقه رسید، که گواهی بر مقدار مصرف زیاد این میله‌ها در آن زمان است. این میله‌ها برحسب نوع لامپها با قطره‌های مختلف ساخته می‌شدند. مدت کار آنها هرگز از دو یا سه روز فراتر نمی‌رفت، درحالی‌که در این زمان از نیمه شب به بعد، خاموشی در شهر برقرار می‌شد. این عمر کوتاه، هزینه را بالا می‌برد. برای فلزی کردن سطح آن با روش گالوانوپلاستی کوشش می‌شد، هدف از این کار، بویژه رسانیدن جریان برق به نقطه مشخصی از میله و نیز تنظیم شدت روشنایی لامپ بود؛ اما این کار، تنها با جریان متناوب رضایت‌بخش بود و در جریان مستقیم، بهتر بود که از الکتروود فلزپوش تنها برای قطب مثبت استفاده شود.

با تحقیقی که بانو ایرتون در ۱۸۹۵ انجام داد از طرز کار قوسها اطلاعات دقیقی به دست آمد. شدت روشنایی نمونه‌های رایج از ۱۵۰ تا ۴۲۵ شمع اعشاری تفاوت می‌کرد. در استاندارد بین‌المللی، هر شمع اعشاری را برابر ۰/۱۰۴ کارسل carcel در فرانسه، ۱/۱۲ هفتر در آلمان و ۰/۹۸ شمع در انگلستان تثبیت کردند. در همین بررسیها معلوم شد که شدت جذب شده بین ۵ و ۱۰ آمپر در ولتاژهای ۴۰ تا ۴۵ ولت تغییر می‌کند. بازده درخشانی از ۸ تا ۱۲lm بر وات تغییر می‌کرد. افت ولتاژ در الکتروود مثبت، ۴/۵ بود و بقیه اصولاً مربوط به قوس می‌شد و الکتروود منفی تنها چند ولت تأثیر داشت.

کمی پس از آن، میله‌های «فتیله‌ای» ساخته شد که مغز آن خمیری از سیلیکات و دوده چراغ بود. این مغز را با خمیری از زغال، پیش از پخت آن، می‌پوشانیدند. در واقع نشان می‌دادند که درخشندگی، بیشتر مربوط به الکتروودها و اصولاً از آند است، نه از خود قوس؛ و از اینجا بود که به بخارهای متعلق به مواد غیرزغالی توجه شد. بخارهای پتاسیم امکان می‌دادند تا قوس با فشاری کمتر، مثلاً ۴۵ ولت با فاصله‌ای کمتر، ۳ تا ۵ میلی‌متر، حفظ شود. این بخارها، نوری رنگین و گرم‌تر ایجاد می‌کردند.

قوسهای لامپی: این مفاهیم با پیدایش قوسهای بین الکتروودهای فلزی درون محفظه‌های بسته مشخص شدند. در این محفظه‌ها فلزهای تبخیر شده از نظر درخشندگی لامپها و رنگ نور، نقش مهمی داشتند.

در سال ۱۸۴۶ آقای استیت اندیشه محبوس کردن زغالهای لامپ در ظرف سر بسته را ابراز داشته بود؛ این اندیشه مقدار سوخت را کاهش می‌داد و فرسایش میله را به ۲۵ میلی‌متر در ساعت پایین می‌آورد. در سال ۱۸۹۷ آقای مارکس<sup>۱</sup> محفظه در بسته‌ای را به نمایش گذاشت که شماری

از نواقص ذاتی سیستم در آن برطرف شده بود که از آن میان می‌توان از رسوب ذرات زغال روی سطح داخلی محفظه نام برد که همچون ورق نازک سیاهی از درخشش دستگاه می‌کاست. این سیاهی با بالا بردن ولتاژ تا ۸۰ و امکان دخول کم هوا در محفظه - کاری که سوخت کاملتر زغالها را تأمین می‌کند - برطرف شد. قوس برقی دیگر به سر میله (مداد روشن) نمی‌چسبید، درحالی‌که در بیشتر انواع لامپها، این‌طور بود؛ بلکه به تناسب سوخت، دور میله می‌گردید و جنب آن قرار داشت. عمر محفظه‌های در بسته به صد تا دویست ساعت رسید، درحالی‌که عمر آنها در گذشته ۱۲ تا ۱۸ ساعت بود. این امر، پیشرفت مهمی به‌شمار آمد.

لامپهای دارای الکترودهای زغالی نمکسود در سالهای ۱۹۰۵ - ۱۹۱۰ بیشترین کاربرد را داشتند. در آن دوران لامپهای کوچک با میله‌های نازک در اغلب جاها دیده می‌شد. مصرف آنها ۱ تا ۳ آمپر بود و نوری بنفش‌فام می‌دادند و هر شمع بیش از یک وات مصرف نداشت و لامپهای دارای توان زیاد ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ وات که زغالهای آنها به شکل V بود قوس آنها کمی به بالا تمایل داشت. چگالی زیاد جریان مثلاً در لامپ کربن<sup>۱</sup> بازده را بالا می‌برد. دوام کاری این نوع لامپها، بدون شارژ مجدد آنها، به ۵۰ ساعت رسید.

وسایل دیگری نیز تحقیق شدند. آقای بلوندل در ۱۹۰۵ لامپهای «هولوفان»<sup>۲</sup> را ساخت که شیشه مخطط آنها بهترین انتشار افقی نور را، با وجود یک جذب ۱۰٪ بالاتر از شار نوری، تأمین می‌کرد.

جاودانگی لامپهای قوسی: قوسهای برقی با وجود رقابت لامپهای التهابی، حتی در روزگار ما هم، در کار هستند. آنها ویژه تجهیزات چراغهای دریایی هستند و از همان آغاز کار سینما برای آپاراتهای آن و از بدو جنگ جهانی اول برای نورافکنهای دفاع ضد هوایی و بالاخره از سالهای ۱۹۲۰ در استودیوهای فیلمبرداری در رقابت تنگاتنگ با لامپهای التهابی به‌کار گرفته شدند. اما قوس در همه این کاربردها به‌عنوان یک منبع نوری می‌بایست با وسایل اپتیکی خاصی احاطه شده باشد که اصل آن به‌طور کلی بر کاربرد عدسی با مقیاس فرنل قرار دارد.

با این‌همه، بهتر شدن درخشندگی طی دهه‌های نخست سده بیستم انجام گرفت و آن در پرتو پیشرفت تکنیکهایی بود که بر کاربرد عاقلانه الکترودهای فلزی با ترکیبهای جدید تکیه داشتند. فرو - تیتان را در آغاز به‌جای زغال به‌کار بردند. بهترین بازده‌ها از آن لامپهایی بود که با ولتاژ ۴۸ تا ۵۵ ولت و شدت ۳/۵ تا ۵ آمپر کار می‌کردند. اما این لامپها عیب مزاحمی داشتند و آن تشکیل کاربید تیتان، ماده‌ای عایق، در سر الکترودها بود. برای اشتعال لازم بود وسیله خاصی ابداع کنند،

اما نتیجه خوبی نداد.

در دنباله این کار، ناگزیر به خلق ماده‌ای رسیدند که در اثر تخلیه برقی بسیار متفاوت روشن می‌شد. تجربیات نشان دادند که در قوسهای بین فلزات، تنها سطح کوچکی از الکترودها تابنده می‌شوند و تأثیر الکترودها در تابندگی لامپ، زیاد نیست. به پدیده تازه‌ای برخورد کرده بودند، که در واقع عبارت بود از بخارهای فلزی که خود قوس را تشکیل می‌داد و درخشش را سبب می‌شد. ترکیب هوشمندانه‌ای در سال ۱۹۰۳ اساساً بوسیله کوپر-هیویت<sup>۱</sup> به آزمایش گذارده شد. این ترکیب لوله‌ای بود که آن را تخلیه کرده بودند و الکترودها بالایی آن از زغال بود. الکترودها پایینی، از نعلبکی گودی محتوی جیوه تشکیل می‌شد. بخار جیوه که در اثر نشر کاتدی یونیده می‌شد قوس را پدید می‌آورد. شعله پایداری به دست می‌آمد، اما این شعله فاقد پرتوهای قرمز بود، که روی منابع نوری دیگر تأثیر داشت. لامپ آقای کوپر-هیویت را می‌توان نخستین لامپ تخلیه‌ای دانست که با جریان متناوب کار می‌کرد.

آقای هریوس کوش<sup>۲</sup> با تعویض لوله‌های شیشه‌ای با لوله‌های کوارتزی به دماهای پنج تا شش هزار صدبخشی در بخار دست یافت و لامپهای بسیار قوی از ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ شمع با ولتاژ ۲۲۰ برای روشن‌سازی فضاهای بزرگ ساخت. بعدها لامپهایی از شیشه ویژه ساختند که نور بنفش و ماورای آن را که از قوس ساطع می‌شد جذب می‌کرد.

در همین زمان بود که ترکیبی از بخار جیوه و لامپهای ملتهب برای روشن‌سازی کارگاهها پیشنهاد شد که ۳۰۰ تا ۵۰۰ شمع نور داشت، این ترکیب با دخالت دادن تابشهای قرمز در نور بخار جیوه که سبفامی آن دلچسب نبود طرفداران زیادی یافت. بعدها، از سال ۱۹۳۰ بخار جیوه همراه بخار سدیم در لامپهای تخلیه‌ای برای بعضی روشناییهای خارجی به کار گرفته شدند؛ این روش هنوز هم دستخوش تحولاتی است.

لامپهای با تخلیه برقی: روش تخلیه برقی در گازها، که آقای گایسلر<sup>۳</sup> آن را در حدود سال ۱۸۵۸ با ساخت لوله‌ای با هوای بسیار کم برای این تجربیات پایه گذارده بود، بنوبه خود رواج یافت. تکامل آهسته امکانات فنی، بویژه در زمینه ساختار و شکل الکترودها و، از آغاز سده بیستم، در دسترس بودن گازهای کمیاب جو، امکان ساخت وسایلی برای روشن‌سازی را فراهم آوردند که از سالهای ۱۹۳۰ به بعد اهمیت فراوان یافتند. آقای مور<sup>۴</sup> در سال ۱۸۹۶ از تابشهایی استفاده کرد که ویژه گازها در یک لوله ازت بود که نور زرد طلایی بیرون می‌داد و نیز لوله‌ای حاوی گاز کربنیک با نور سفید. بعدها کاربرد یکی از گازهای کمیاب یا مخلوطی از دو نوع از این گازها، پیدایش گام طولی



از رنگهای نوری را میسر ساخت. کاربرد بخارهای فلزی نیز سهولتهای پرارزشی را از لحاظ فنی در طرز کار این لامپها افزود.

سرانجام کاربرد آثار فلئوئورسانی نیز زمینه کاربرد لوله‌های تخلیه‌ای را گسترده‌تر ساخت. آقای ادمون بکرل در سال ۱۸۵۹ ثابت کرده بود که برخی ترکیبات معدنی، مخلوطهای گوگردی قلیاییهای خاکی و سولفور روی، در لوله گایسلر نوعی نور فلئوئورسانی ایجاد می‌کنند که سراسر طیف نور مرئی را می‌پوشاند. این پدیده‌ها تا مدتها تنها موضوع پژوهشهای آزمایشگاهی بودند. طی سالهای ۱۹۳۰ بود که آقای ژرژ کلود<sup>۱</sup> نخستین لوله‌های تخلیه‌ای با کاتد گرم را ساخت که دیواره درونی آنها با مواد فلئوئورسانی پوشیده شده بود و در آنها یکی از گازهای کمیاب و بخار جیوه را وارد کرده بودند. این لوله‌ها در فشار زیاد کار می‌کردند و برای روشن شدن می‌بایست چندین متر طول داشته باشند. از سال ۱۹۳۵ به‌طور روزافزونی آنها را، نخست بمنظور تزئین نوری به‌کار گرفتند، بویژه در سال ۱۹۳۷ برای تزئین برج ایفل؛ سپس برای روشنایی سالنهای بزرگ اجتماعات و گردهماییها از آنها استفاده می‌شد.

در جریان جنگ جهانی دوم، لامپهای فلئوئورسانی، که با کاتد سرد شهرت یافته بودند و در آنها صدور یونی در کاتد ایجاد نمی‌شد در ممالک متحده آمریکا به‌کار رفتند. این لامپها که با ولتاژ پایین کار می‌کنند در روزگار ما برای روشنایی محلهای سکونت و کار، به گستردگی به‌کار گرفته می‌شوند. آنها پس از جنگ جهانی دوم، بسرعت در همه کشورهای راه یافتند و تکنیک ساخت و کاربرد آنها پیوسته دستخوش تحول بوده است.

گامهایی در ساخت لامپهای فروزنده: از سال ۱۸۸۰ لامپهای دارای افروزه‌های ملتهب، روشنایی خانه‌ها را با الکتریسیته تأمین می‌کنند. پس از دستیابی به مرحله‌ای از تکامل متوجه شدند که لامپهای قوسی، در اثر فروزندگی سرهای الکترود یا بخارهای فلزی روشن می‌شوند. در مرحله‌ای از پژوهش، بین سالهای ۱۸۷۷ - ۱۸۸۰، مخترعان چندی کوشیدند تا از به‌اصطلاح اثر ژول برای ایجاد فروزندگی در الکترودهای کربنی استفاده کنند - کاری که لامپهای قوسی را تداعی می‌کند. این لامپها از نوع فروزنده با هوای آزاد بودند، سیستمی که میله زغالی را متناسب با مقدار سوخت آن جلو می‌برد تا کنتاکت آن را با قطعه یا دیسکی از زغال حفظ کند، از لامپ قوسی گرفته شده بود. دو مخترع تقریباً همزمان یک ابتکار را پیشنهاد کردند: امیل رنه<sup>۲</sup> از فرانسه و ریچارد وردرمان<sup>۳</sup> از انگلستان، انواع لامپهایی که آنها دستور ساختشان را داده بودند بسیار پیچیده بودند. کمپانی یابلوچکوف پس از اینکه سه یا چهار سال از خرید اختراعات آنها گذشته بود کوشید تا از

این سیستم بویژه در لندن بهره گیرد. انواع دیگری در همان دوران در اروپا و ممالک متحده امریکا وجود داشتند اما موفقیت لامپ سوان - ادیسن آنها را بزودی از مصرف خارج ساخت.

در واقع ردیفی طولانی از کارهای گوناگون که از سال ۱۸۴۱ آغاز شده بود و به اختراع لامپ ادیسن پایان پذیرفت و جملگی برپایه بهره گیری از اثر ژول روی افروزه ای بودند که جریان برق از آن می گذشت و آن را درخشان می کرد با کارهای فردریک مالیین<sup>۱</sup> انگلیسی آغاز شده بود. افروزه آن نخست طبعاً از پلاتین بود. گرچه بدین ترتیب از یک واکنش احتراق پرهیز شده بود اما با مشکل ذوب شدن پلاتین روبه رو شدند که کمی از دمای لازم برای گرمای سفید پلاتین بالاتر بود. مسأله بسیار ظریف، همانا اتصال افروزه درخشان به سرهای اتصالات بیرونی بود.

چنین می نماید که پس از مدت بسیار اندکی به اندیشه استفاده از افروزه کربنی در محفظه ای تخلیه شده از هوا دست یافتند. کارهای نخستین در این راه شکل قصه را دارد. قدیمترین آنها با نام به اصطلاح مخترعی امریکایی: ج. و. استار<sup>۲</sup> و هموطن وی کینگ<sup>۳</sup> که می توان وی را تا حدودی قربانی این راه نامید، همراه است. آقای کینگ در واقع به سال ۱۸۴۵ این اختراع را به ثبت رسانیده بود. آقای استار در همان سال به کمک و همراهی شخصی انسان دوست به لندن رفته بود و در آنجا اختراع خود را به نمایش گذارد. وی آویزی ساخته بود که ۲۶ لامپ را حمل می کرد و این عدد همان تعداد ایالت هایی بود که ممالک متحده را تشکیل می دادند. آقای فازاده در این نمایش که با استقبال زیادی روبه رو شد حضور داشت. گویا این استقبال بیشتر انگیزه کنجکاو داشته است تا نتایج رضایت بخش. این لامپ کربنی که چیزی بیش از یک قوس برقی که با آن آزمایش هایی انجام می دادند نبود، هنوز در مرحله ای نبود که بتواند در مشکل روشن سازی تحولی ایجاد کند.

برای حل مشکل روشن سازی دو مانع باید برطرف می شدند. نخست باید نوعی افروزه کربنی مناسب این کار ساخته می شد. کربن به عنوان یک ماده، بهترین خواص مناسب این کار را داشت. اواخر این سده بود که معلومات علمی درباره این ماده به دست آمد. نخستین انتخاب، بدین ترتیب، نتیجه بررسی های تجربی بود. بعدها این انتخاب به طور طبیعی از سوی سازندگان لامپ های افروزه ای سوان و ادیسن تجدید شد. اما طی سالهای ۴۰ و چند دهه پس از آن نیز تنها روش شناخته شده برای تهیه افروزه کربنی، تراش هرچه ظریفتر زغال قرع بود.

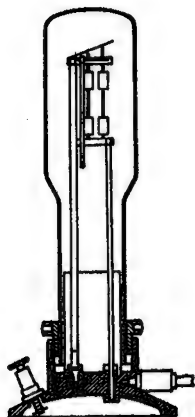
مانع دوم، ناتوانی وسایل موجود برای خلأ سازی بود. تلمبه های مکانیکی امکان پیش بردن خلأ را تا آنجا که از سوخته شدن و فروپاشی زغال پرهیز شود، نداشتند. دوام میله های کربنی بسیار کم بود و لامپ های شیشه ای بسرعت سیاه می شدند.

اما این کوششها ادامه یافت. آقایان انگلیسی گرینز<sup>۱</sup> و استیت در سال ۱۸۴۶ افروزه کربنی را با تیزاب سلطانی (اسید نیتریک + اسیدکلریدریک) عمل آوردند تا آن را خالص گردانند. پژوهشگران دیگری نظیر آقای پتری<sup>۲</sup> در سال ۱۸۴۹ از نو، فلزات بویژه ایریدیم و آلیاژهای آن را به کار گرفتند؛ آقای شانزی<sup>۳</sup> نیز در ۱۸۵۹ از پلاتین استفاده کرد، اما موفقیتی به دست نیاورد. آقای جوزف و. سوان شیمیدان انگلیسی به مدت دوازده سال با پلاتین و مقوایی که آن را زغال کرده و در لوله های شیشه ای بین دو قطعه زغال گذاشته بود کار کرد و لامپ را از هوا تخلیه می کرد. وی با این آزمایشها توانست با گذراندن برق از افروزه، گرچه بسرعت متلاشی شد، آن را سرخ کند. سوان در سال ۱۸۶۰ تحقیقات خود را رها کرد.

آقای آلکساندر لودیگین<sup>۴</sup> فیزیکدان روس با ساختن نوعی لامپ زغالی در سال ۱۸۷۳ جایزه آکادمی علوم سن پترزبورگ را برد. این لامپ را غالباً به عنوان نخستین نمونه لامپهای فروزنده ذکر می کنند. در حقیقت باید گفت که آقای لودیگین و به کارگیران لامپ وی که نمونه نخستین آن را، برای اینکه مورد استفاده قرارگیرد، اصلاح کردند هیچ یک از مشکلات مربوط به لامپهای پیشین را برطرف نساختند. آنان فقط توانستند لامپهای پیشین را با مهارت دستکاری کنند. این لامپ چند میله زغالی داشت که با مصرف یکی، میله دیگری وارد مدار تغذیه می شد و زمانی که آخرین میله مصرف می شد میله ای از مس مدار را بسته نگاه می داشت تا لامپ بعدی روشن شود (شکل ۶۱). تنها مزیت این سیستم امکان جدا کردن لامپ و تجدید کارایی آن با تعدادی زغالهای تازه بود. در بعضی از مدلها هوای لامپ را تخلیه می کردند اما میله زغالی به علت طرز نصب آن فرو می پاشید؛ از خلأ کردن بعضی هم صرف نظر شده بود و تنها به هوانا پذیری شدید آنها اکتفا می شد، بدین امید که اکسیژن محبوس در لامپ، عمر کوتاه تر از میله زغالی دارد. پهای تمام شده این لامپها بسیار بالا بود و طی چند سال تنها نقش تقنی داشتند.

اندیشه جالبی از سوی آقای ویلیام ا. ساویر<sup>۵</sup> امریکایی ابراز گردید که پس از گذشت چندین سال بوسیله آقایان اروینگ لنگمیر و ژرژ کلود دنبال شد. آقای ساویر پیشنهاد کرده بود که افروزه زغالی را در محیطی از یک گاز خنثی - مثلاً نیتروژن - قرار دهند، نه اینکه هوای آن را به طور ناقص خالی کنند. ساویر در فهرست الکتریسیتهای امریکایی که همزمان با ادیسن برای حل معجزه آسای روشن سازی با لامپهای فروزنده کوشیده اند، جای دارد.

شخصیت ادیسن: آقای ادیسن در سال ۱۸۷۷ با اختراع یابلوچکوف به تفصیل آشنا شد و در سال بعد، کارهای روشن سازی خیابان اپرای پاریس، به مناسبت سومین نمایشگاه عمومی فرانسه،



شکل ۶۱. لامپ لودیگین.

میله‌های زغالی با طولهای نابرابر، میان دو بشقابک بالا گذاشته شده‌اند میله‌ای مسین، موازی آنها، زمانی که آخرین میله زغالی مصرف شده است، مدار را بسته نگاه می‌دارد. در این لامپها خلا کردن به‌طور ناقص انجام گرفته است.

در ممالک متحده آمریکا با تحسینهای فراوان روبه‌رو شد. مطلبی که ذهن پژوهشگران آمریکایی را به خود مشغول می‌داشت ظاهراً این بود که مشکل نوع تازه روشن‌سازی، تنها با کاربرد لامپی که با مهارت طراحی شده باشد حل نمی‌شود؛ بلکه حل آن در گرو حل سیستم تولید و توزیع برق است. در این دوران در آمریکا دینام هنوز، مانند کاربرد لامپ قوسی، پدیده تازه‌ای بود. نخستین دینام را در آمریکا آقایان م. فارمر<sup>۱</sup> و ویلیام والاس ساختند. فارمر برای خیابانها، کارگاهها و انبارها چندین تأسیسات روشنایی با لامپهای قوسی ایجاد کرده بود. مبتکر دیگری در این زمینه آقای چارلز ف. براش بود. ادیسن هنوز توجهی به این مسائل نداشت و اختراعات متعدد دیگری، در آن زمان، ذهن او را مشغول داشته بودند. آخرین اختراعاتی که وی را بلندآوازه کرده بودند، در سال ۱۸۷۷ میکروفون زغالی بود که همراه آقای بل آن را اندیشیده بود و در اواخر همان سال نیز اختراع گراموفون دارای سیلندر و دیافراگم، با کمکهای فکری همکارش آقای جان کروزی<sup>۲</sup> انجام گرفت. در آن زمان، در نیوجرسی آقای ادیسن را جادوگر منلوپارک<sup>۳</sup> می‌نامیدند؛ زیرا در آنجا وی در

۱. Moses Farmer (۱۸۲۰-۱۸۹۳): مخترع آمریکایی، متولد بوسکان-م.

۲. J. Kruesi (۱۸۴۳-۱۸۹۹): مهندس مکانیک متولد اشیایکر در سوئیس، که بعدها (۱۸۷۵) به آمریکا رفت-م.

3. Menlo-Park

سال ۱۸۷۶ نخستین کارگاه پژوهشی بسیار محقر خود را برپا ساخته بود. وی در این کارگاه، که پیوسته بزرگتر می‌شد و در آغاز برای تحقیق دربارهٔ سیستم روشن‌سازی با برق ساخته شده بود، گروه روزافزونی از همکاران علمی و فنی خود را گرد آورد. ادیسن، شخصی خودآموخته بود و زمانی‌که کار را شروع کرد، به‌هنگام تحقیقاتش همراه با گراهام بل، در رشته برق، که پایگاهی علمی داشت احساس کرد که نیاز به اشخاصی صلاحیت‌دارتر از خود دارد. ادیسن سرمایه‌ای در اختیار داشت و توانسته بود اعتماد بانکدارانی همچون مورگان را به‌دست آورد. این بانکداران سرمایه لازم برای تأسیس شرکتهای صنعتی را گردآوری می‌کردند و شرکتهایی که سهام خود را به بانکها می‌فروختند و می‌توانستند حقوقهای خوبی به کارکنان خود بپردازند.

آقای تامس الو ادیسن برخلاف افسانهٔ بسیار شایع و اینکه خود در دامن زدن بدان بسیار می‌کوشید، هرگز یک دانشمند نبود. حتی می‌توان گفت که وی در سراسر عمر کاری خود، یک ضد دانشمند بوده است. شخصیت وی نمونهٔ مخترعان کاسب آمریکایی آن زمان، نظیر وستینگهاوس، پولمن<sup>۱</sup> و بعدها واترمن است که استعدادهای آنان در اوضاع و احوال رونق و گسترش سریع صنعت در دوران پس از جنگهای داخلی، شکوفا شد و امکان بلندپروازیهای زیادی برای آنها فراهم آمد. به برکت این جنگها بانکها قدرت اداره و رهبری همه سرزمینهای ممالک متحده را بتدریج و به‌طور منظم به‌دست خود گرفتند.

نبوغ ادیسن، سرشتی عمیقاً پراگماتیستی داشت و همهٔ اندیشه‌های تازه‌ای را که بیان یا آزمایش شده اما در کشورهای دیگر از آنها استقبال نشده بود می‌ربود و بسرعت منافی را که از آنها می‌توانست به‌دست آورد تشخیص می‌داد و درعین‌حال خود را اسیر دردسرهای روشهای اکید مسیرهای علمی و حرکت مستقیم به‌سوی هدف نمی‌کرد. هوش سرشارش وی را توانا می‌ساخت تا هستهٔ اساسی داده‌ها را مورد استفاده قرار دهد و کارهای همکاران خویش را در جهت ساختهای هوشمندانه و عملی سوق دهد. بنابراین، در قضیهٔ روشن‌سازی شهر با برق، آقای ادیسن بود که به فیزیکدانان خود اهمیت قانون اهم و استفاده‌ای که از آن می‌توان برد را توضیح داد و به آنها امکان داد که با ابزار علمی خویش به‌پیش بروند.

وی این روحیهٔ خطر کردن و نیز توانایی تشخیص مؤثر و سریع راه انجام دادن کارهایی را که کسان دیگری که بدون وسایل چشمگیری بودند و به‌نظرشان عملی نبود از اجداد خود به ارث برده بود. در زمانی‌که همهٔ کسانی که روحیهٔ وی را نداشتند از خطر کردن پرهیز داشتند، آقای ادیسن همین‌که مطمئن می‌شد که اطلاعاتش کافی است، بسرعت دست به‌کار می‌شد.

این روحیه گاهی غیرمنطقی است زیرا نمی‌خواهد زمان را برای کامل کردن اطلاعات خود پیش از شروع کار از دست بدهد. وی با آمادگی هوشمندانه برای رفع موانعی که در جریان کار با آنها برخورد می‌شد، با برخورداری از شامه فوق‌العاده و توانایی وسیع کارش وسایل لازم را فراهم می‌ساخت. در این زمینه از نیروی فراوان خلاقیت بهره می‌گرفت. ادیسن همین‌که به شهرت دست یافت عطشی تمام ناشدنی برای کسب ثروت از خود نشان داد. وی بسیار سریع و با زبردستی فراوان روزنامه‌ها را به تمجید از شخصیت خود واداشت.

شاید دلیل این کار، صرفاً فرونشاندن خودخواهی نبود. وی می‌بایست تحسین و اعتماد مردم را جلب می‌کرد تا افزایش پیوسته پول را تأمین کرده باشد. به همین جهت بود که وی توانست تردیدها و هشدارهای سرمایه‌دارانی را که در جریان کارهایش درباره برق ابراز می‌شدند نادیده بگیرد و جنگی را که رقبایی از قبیل سایور و نیز فروشندگان گازهای روشنایی، که در صورت موفقیت وی کار و کسب‌شان را از دست می‌دادند، علیه وی آغاز کرده بودند با پیروزی به پایان رساند. باز به همین جهت بود که در سال ۱۸۷۸ که جوانی سی‌ویکساله بود توانست بهترین دانشمندان زمان خود، نظیر جان هاپکینسون انگلیسی را برای بهره‌گیری از مشورت‌های ثمربخش وی به همکاری با خود فراخواند.

توده‌های بزرگ مردم در اثر بذرهای اعتمادی که این مخترع جادوگر، که از موفقیتی به موفقیت دیگر دست می‌یافت، با دقت در دلشان کاشته بود با اشتیاق تمام مجادلات وی را دنبال می‌کردند و گروه‌گروه به دیدن روشن‌سازی با برق یا تراموایی که در منلو پارک برپا کرده بود می‌رفتند. وی از هیچ فرصتی برای نشان دادن تفاخرآمیز توجهی که به کوچکترین مسأله مربوط به طرح یا اجرا داشت غفلت نمی‌کرد و درباره اجرا شدن همه آزمایش‌ها، همه امکانات و به‌دست آوردن بهترین راه‌حل تعصب می‌ورزید.

مثلاً زمانی‌که لیف خیزران را برای تهیه افروزه کربنی لامپهای خود برگزید، در سال ۱۸۸۰ با تحمل هزینه‌ای گزاف، چندین نفر را مأمور تحقیق در همه مکان‌هایی کرد که انواع گوناگون خیزران در آنها می‌رویدند تا مناسبترین خیزران برای این منظور را بیابند. فرستادگان وی بیش از یک سال امریکای مرکزی، سواحل آمازون، هندوچین، سیلان، هند، چین و ژاپن را درنوردیدند. بعضی از آنها شدیداً بیمار شدند و یکی در کوبا مرد. اما از همان آغاز این تجسس‌ها، آقای و. ه. مور در ژاپن، اعلام کرده بود که مناسبترین نوع خیزران را یافته است و ادیسن از آن آگاه شده بود. با این حال، وی اجازه داد که همه افراد مأموریت‌های خود را به انجام رسانند و علت این امر را شاید بتوان ارضای هوس

وی در انجام سفرهای فوق‌العاده‌ای از نوع سفرهایی دانست که ژول ورن آنها را شرح داده است؛ وی ستایشگر داستانهای تخیلی بود، اما البته انگیزهٔ آن حفظ آوازهٔ عظمت وی در مؤسساتش بوده است.

شخصیتی که وی از آن برخوردار شده بود نیز نوعی قدرت مطلق نسبت به همکارانش را ایجاد کرده بود.

ادیسن اشخاصی را برمی‌گزید که بتوانند کمبودهای دانشهای او را در همهٔ زمینه‌ها - شیمی، فیزیک، الکتریسیته و مکانیک - پر کنند و بویژه در جریان این قضیهٔ روشن‌سازی با برق که مدیریت آن چهار سال ۱۸۷۸ - ۱۸۸۲ به طول کشید این قدرت مطلق وی همزمان با کارگران ورزیده‌ای که آمده بودند تا در کارگاههایی که وی در منلو پارک برپا داشته بود کار کنند سرعت افزایش یافت. وی بدین ترتیب سپاهی از اشخاص با صلاحیت در همهٔ زمینه‌ها داشت، سپاهی که می‌توانست به رگبار اندیشه‌های وی که پیاپی عرضه می‌شدند جامهٔ عمل ببوشد. اکثر این اشخاص زمانی طولانی به وی وفادار ماندند و از تب خلاقیت وی گذران می‌کردند.

گرچه تعدادی از آنان بعدها به ناگزیر حقوق ادیسن را در بعضی اختراعات مورد تردید قرار دادند (مثلاً آقای گوردون هندریکس<sup>۱</sup> در مورد کیتوسکوپ)، اما همگی در زمان خود اذعان داشتند که نام آنها هرگز نمی‌تواند در زمانی که یک نوآوری هیجان‌آور ایجاد می‌شد، همردیف نام ادیسن باشد. آقای ادیسن، همه چیز بود و هرگز کسی را در افتخار لقب مخترع سهیم نمی‌کرد. شاید هر یک از اطرافیان وی فکر می‌کردند که سودشان در این است که نام و شخصیت این رئیس افسانه‌ای خود را خدشه‌دار نسازند.

آقای ادیسن هیچ‌گاه و برای هیچ‌یک از نوآوریها مبتکر و نخستین کس نبوده است، اما شخصیت وی آنچنان بود که وقتی هم در جای دوم قرار می‌گرفت و پیش از نفر اول نام خود را به ثبت می‌رسانید، اعتراضات سرعت خفه می‌شدند و انگهی زمانی که وی لازم می‌دید کار دیگری را بخرد، یا با آن شرکتی تشکیل دهد (مثلاً شرکتی که سوان را در انگلستان حمایت می‌کرد) وسایل لازم را در اختیار داشت و هر یک از دو طرف سود خود را در این کار می‌دیدند.

حتی رفتارهای کودکانه‌اش را هم به سود وی منعکس می‌کردند. در سال ۱۸۸۷ وی دستور ساخت آزمایشگاه‌های جدیدی در وست اورنج<sup>۲</sup> را صادر کرد. اهمیت این آزمایشگاه‌ها ده برابر بیشتر از آزمایشگاههای منلو پارک بود و در پایان نام: نشنال ادیسن لابوراتوری بر آنها گذارده می‌شد.

1. G. Hendricks

۲. West Orange: شهری در شمال شرقی نیوجرسی به فاصلهٔ ۵ کیلومتری شمال غربی نیوارک امریکا.

وی کمی بعد به آقای ادوارد بلین<sup>۱</sup>، که از آزمایشگاه محقر خود راضی به نظر می‌رسید گفت که اگر آزمایشگاهی ده برابر بزرگتر داشت ده برابر بیشتر می‌توانست کار انجام دهد. مطبوعات نیز این اظهارات را باز با افتخار تکرار کردند.

یکی از نویسندگان شرح حال وی می‌نویسد: «تقدیس شخصیت» آقای ادیسن در سال ۱۹۰۴ هنگام نمایشگاه سن لویی به مناسبت بیست و پنجمین سالگرد ساخت لامپهای دارای افروزه کربنی انجام گرفت. آقای ادیسن تا پایان زندگی در سال ۱۹۳۱ در نظر جهانیان، تجسم قدرت خلافت «دانشمندان» امریکا بود. هموطنان وی نسبت به این شخصیت که نماد پایه‌های سلطه صنعتی و اقتصادی آنها بود حساسیت ویژه‌ای داشتند. خود ادیسن این چهره را با رضایت خاطر می‌پذیرفت. وی تقریباً همه شخصیت‌های جهان صنعتی، علمی و سیاسی را طبق مقاوله‌نامه‌ای که بدقت تنظیم شده بود پذیرفته است و در پایان دیدارها در برابر همه همکارانش که جمع شده بودند عکسی را که پیش از آمدن مهمان آماده شده بود به وی اهدا می‌کرد.

پیدایش سیستم ادیسن: آقای ادیسن پیش از اینکه درباره سیستم روشنایی شهری آقای گرام-یابلوچکوف اطلاعاتی دریافت کند درباره تعمیم احتمالی روشنایی با برق برای خانه‌ها اندیشیده بود، اما آن را هنوز در فهرست مسائل در دست اقدام وارد نکرده بود، این کار در پاییز ۱۸۷۸ به دنبال پافشاری آقای جرج ف بارکر، استاد علوم‌ی که از دوستان وی بود و نیز یک مشاور شرکت تلگراف و سترن یونیون که بعدها از پشتیبانان جدی او شد، در دستور کار وی قرار گرفت. او برای اینکه به اندیشه‌های خود جهت بدهد، به بررسی تأسیساتی پرداخت که والاس برای روشن‌سازی مفرغ‌ریزی خود با هشت لامپ قوسی ایجاد کرده بود. شکی نیست که در این دیدار بود که وی متوجه شد که برق باید مانند گاز به‌کار گرفته شود: در ابتدا از یک مرکز به توسط انشعابات و روشن‌سازی خانه‌ها بوسیله لامپهایی که شدت آنها بسیار کمتر از شدت قوسهاست.

در این طرح همه چیز بدیع بود: تقسیم جریان هرگز عملی نشده بود و مدت درازی بود که الکتریسیته‌ها متقاعد شده بودند که تقسیم آن امکان ندارد. آقای ایلاپو تامسن که یکی از مشهورترین افراد بود پس از دیدن منلو پارک، در آغاز سال ۱۸۸۰ - که طی آن ادیسن نمایشی از لامپهایی که بتازگی ساخته بود از نظر او گذراندید - معتقد شد که تحقق چنین سیستمی ممکن نیست، زیرا هزینه آن بسیار بالاست و همه مس جهان را مصرف می‌کند.

با این حال، ادیسن مدت چهار سال به‌طور پیگیر کار کرد تا ایستگاه مشهور پل استریت در نیویورک در سپتامبر ۱۸۸۲ به‌کار افتاد. از همه همکاران وی تنها او بود که توانست درک کند که



این لامپ کافی نیست اما برای تجارتي کردن الکتریسته، می‌توان آن را همچون بخشی از یک سیستم کامل که از دینام شروع و به منبع نورانی پایان می‌گیرد دانست و باز او بود که با پشتکار عجیبی سیستم خود را تکه‌تکه برقرار کرد.

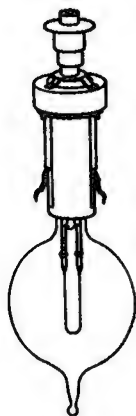
در واقع در اواخر سال ۱۸۷۸ ساختار لامپ به‌عنوان شروع واقعی همه کار بود و افروزه التهابی، تنها وسیله‌ای که به مقتضیات روشنایی خانه جواب مساعد می‌داد. بدین دلیل بود که ادیسن با ساخت لامپ افروزه‌ای، کار خود را شروع کرد. دقیقاً در همین زمان بود که جوزف سوان که کارهای خود را در سال ۱۸۶۰ رها کرده بود، از نو دست به‌کار شد.

لامپ افروزه‌ای سوان: این همزمانی تصادفی نبود. این دو نفر که در آن زمان هیچ رابطه‌ای با یکدیگر نداشتند در واقع دستگاه جدیدی برای خلأ کردن داشتند که در اختیار پیشینیان آنان، و برای سوان در سالهای ۶۰ نبود. آقای هرمان اسپرنگل<sup>۱</sup> آلمانی در سال ۱۸۶۵ دستگاهی ساخت که خلأ را در ظرف سر بسته‌ای که فشار هوای آن کم بود به پیش می‌برد. وی برای این کار، هوای باقیمانده را با جریان دادن قطرات دانه تسبیحی جیوه در لوله شیشه‌ای طویلی که قطر کمی داشت، بیرون می‌راند. شیپور جیوه‌ای اسپرنگل دسترسی به خلأیی در حدود چند میلیمتر جیوه، یعنی فشار بخار خود جیوه را ممکن ساخت.

این وسیله که در واقع مناسب کارهای آزمایشگاهی بود در آغاز زیاد به‌کار گرفته نمی‌شد اما زمانی که لازم شد که فیزیکدانان پدیده تخلیه الکتریکی را در گازهای کم فشار بررسی کنند از آن استفاده کردند. این جریان تحقیقاتی از سال ۱۸۵۵ با آزمایشهای گایسلر آغاز شده بود، آقای هیتورف در ۱۸۶۵ آن را پی گرفت. کروکس دقیقاً در سال ۱۸۷۵ توانست با استفاده از لوله‌هایی که با به‌کار گرفتن دستگاه اسپرنگل خلأ زیادی ایجاد کرده بود شعاع کاتدی را آشکار سازد. این کشف هیجان‌انگیز شهرت این وسیله را به دنبال داشت.

آقای جوزف سوان که شیمیدان بود و روی نیتروژن‌دار کردن سلولوزی کار می‌کرد پنبه را به‌عنوان ماده مورد نظر برگزید. برای کربنی کردن پنبه، رشته‌های نازکی از آن را به شکل حلقه در بوته‌هایی پر از گرد زغال قرار داد. گرچه لامپ بقدر کافی از هوا تخلیه شده بود برای پایدار کردن رشته نخ، کارهای دیگری باید انجام می‌گرفت.

سوان اندیشید که رشته نخ را، زمانی که گازهای موجود در لامپ را تخلیه می‌کند، در لامپ، ملتهب سازد. این همان راه حلی بود که آقای ادیسن هم در همان زمان اندیشید. سرانجام، سوان دستکاری اولیه رشته‌های نخ را پیش از کربنی شدن آنها انجام داد و در سال ۱۸۸۰ توانست



شکل ۶۲. لامپ فروزان سوان.

رشته‌های پایداری به‌دست آورد که دوام آنها به چهار صد ساعت می‌رسید - موفقیتی که به وی امکان می‌داد که لامپی با عمر دو ماه تولید کند.

شکل این لامپ تقریباً همانند شکل لامپ ادیسن بود. لامپ کوچکی که سر باریک آن، که از آن طریق لامپ را تخلیه و هوا بندی کرده بودند به پایه لامپ منتهی می‌شد، دو نوآوری دیگر نیز ویژه آن بود، یکی اتصال سرهای کربن به دو رشته پلاتین، تا کنتاکت برقرار شود؛ دیگر سربیع فوری آن (شکل ۶۲).

سرانجام سوان در سال ۱۸۸۰ امتیاز آن را به‌دست آورد و لامپ روشن خود را در ماه اکتبر همین سال در نیوکاسل به نمایش گذارد. وی با به‌دست آوردن پشتوانه‌های قوی مالی، یک شرکت صنعتی پایه گذارد: *Swan United Electriclight Co* که از سال بعد شروع به‌کار کرد. سوان در نمایشگاه جهانی برق پاریس ۱۸۸۱ برای قرار دادن آویزی در اپرا و آویز دیگری در سالن کنگره الکتریسیته‌ها استفاده کرد. برای توزیع برق از اندیشه‌ای استفاده کرد که در سال ۱۸۷۵ تجربه شده بود و آن تغذیه لامپها به شکل موازی بود، و حال آنکه تا آن زمان تنها تغذیه به شکل زنجیری عملی می‌شد.

لامپ افروزه‌ای ادیسن: ادیسن نیز بنوبه خود از ماه اکتبر ۱۸۷۸ به‌کار پرداخته بود و در همان حالی که در پی ساختن افروزه‌ها، در آغاز با کربنی کردن کاغذ می‌کوشید تصمیم گرفت که طرحهای خود را با به نمایش گذاردن همه عظمتی که در آینده خواهند داشت، به‌نظر توده مردم برساند: چیزی

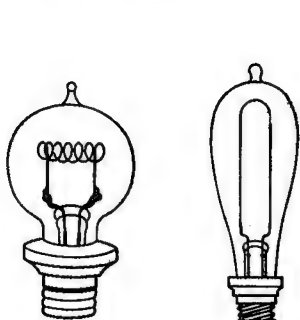
نگذشت که وسترن یونیون که بتازگی امتیازات آقای بل را دربارهٔ تلفن به‌دست آورده بود و بیم داشت از اینکه امتیاز استفاده از روشهای آتی ادیسن به کسان دیگری واگذار شود به تحریکاتی پرداخت: گروهی از سرمایه‌داران عمدهٔ نیویورک، شرکتی با نام Edison Electric Light Company با سرمایهٔ اولیهٔ ۳۰۰۰۰۰ دلار تشکیل دادند. از ۳۰۰۰ سهم آن ۲۵۰۰ سهم بخاطر دستاوردهای آینده به ادیسن داده شد. این سرمایه‌داران، بنا به یادداشت ماتیو جوزف‌سون<sup>۱</sup>، به طرحهای ادیسن، نه به‌کارهای انجام شدهٔ وی خود را متعهد کردند. این امر نشان می‌دهد که چه اعتمادی آقای ادیسن در دل آنها ایجاد کرده بود.

زغال جسمی بود که ادیسن از خواص آن بخوبی آگاه بود. طبیعی است که وی نخست آن را به‌کار برد. اما، کاغذ، ماده‌ای که آن را به زغال تبدیل می‌کرد در آغاز موفقیتی نداشت. این جسم لیفی، همگن نبود. ادیسن در همان زمان از بررسی فلزاتی که پیشینیان وی به‌کار گرفته بودند غفلت نمی‌کرد. از مارپیچ پلاتین استفاده می‌کرد، درحالی‌که فلزات موجود در معدن پلاتین و توریم را هم به‌کار می‌گرفت. در جریان همین بررسیها بود که به‌روش کاری سوان پی‌برد: تخلیهٔ لامپ با شیورهٔ اسپرنگل؛ گرم کردن افروزه با استفاده از اثر ژول برای بیرون راندن گازهای محتوی در آن؛ بستن انتهای لامپ با مشعل. اجسام گوناگونی که آزمایش شدند نتیجهٔ مطلوبی ندادند؛ آنها شکستنده، با روشنایی کم و پرهزینه بودند. ادیسن به زغال بازگشت و بدین نتیجه رسید که تنها یک لیف گیاهی همگن می‌تواند نتیجهٔ خوبی داشته باشد. بنابراین به خیزران و جست‌وجوی نمایشی آن دست زد. طبعاً گیاهان متعددی را مورد آزمایش قرار داد، که از آن میان الیاف پنبه بود که آن را به‌عنوان کاغذ، سرانجام به ثبت رسانید.

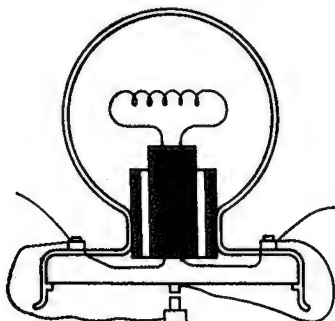
این سال برای ادیسن و همکاران وی سال کار بی‌وقفه بود، اما پس از یک سال، خود لامپ و نیز سیستم اتصال افروزهٔ کربنی به سرهای فلزی و سرپیچ آن را، که هنوز نام وی را بر خود دارد، ساخته بود (شکلهای ۶۳ و ۶۴). از پلاتین نخست برای سرهای اتصال استفاده کرد، اما بعداً آن را با آلیاژی که مانند پلاتین ضریب انبساط شیشه را دارد، عوض کرد.

آغاز کاربرد سیستم ادیسن: اما این لامپ به‌نظر وی کامل نبود. در همان سال ساخت دینامی را بررسی کرد که بتواند برقی با ولتاژ ثابت بدهد و نوری با شدت ثابت ایجاد کند. وی در این کار از مشورت‌های چند کارشناس برق مشهور در محیطهای خود استفاده کرد و بویژه دینام زیمنس را مورد بررسی قرار داد. دینام وی همین دینام زیمنس، اما مجهز به مغناطیسهای برقی بود.

این مغناطیسها روبه بالا کشیده شده بودند و شکل آنها بسرعت برای خوانندگان رساله‌ها و



شکل ۶۴. لامپهای فروزان ادیسن با سریج  
(۱۸۸۰ - ۱۸۸۱).



شکل ۶۳. نخستین لامپ فروزان ادیسن  
(۱۸۷۹).

مجلات فنی مأنوس شد. نوع نخستین را *Longue-taille Mary Ann* نامیدند. وی در همین سال ۱۸۷۹ دستور داد تا چندین عدد از آن در منلو پارک ساخته شود. طی مدتی که این کارها دنبال می‌شد اطلاعاتی دربارهٔ آن به‌طور جسته‌گریخته به مطبوعات راه می‌یافت تا کنج‌کاوای مردم بیشتر شود. بدین ترتیب، زمانی که در هفتهٔ نوئل درهای منلو پارک با چندین لامپ فروزندهٔ روشن به روی توده‌های مردم باز شد صدها نفر از بازدیدکنندگان برای دیدن معجزه تازهٔ این جادوگر از جای خود به حرکت درآمدند. ادیسن همیشه متفرعن، که هنوز تنها چند لامپ به‌بهای شش ساعت کار دو نفر برای هر لامپ تولید کرده بود اعلام داشت که این لامپها را ۲۵ سنت خواهد فروخت و تولید آنها در هر روز به چند صد عدد خواهد رسید.

ادیسن در سال بعد همهٔ سیستم تولیدی خود را طرحریزی کرده بود. تأسیسات مرکزی برای روشن کردن تعدادی از بلوکهای مسکونی، توزیع برق به توسط سیمهای ورودی، کابلهای تغذیه‌کننده که در لوله‌های زیرزمینی روی عایقها گذاشته می‌شدند، انشعاب لامپها به‌طور موازی که با فیوز و کلید قطع و وصل و حتی کنتور برای تعیین مقدار مصرف مجهز بودند. این تأسیسات در تابستان سال ۱۸۸۱ در منلو پارک آزمایش شد و بعدها با اختراع سیستم توزیع سه‌سیمی که در میانهٔ سال ۱۸۸۳ آزمایش شد کامل گردید. در این مدت ادیسن خود را وقف به‌کار اندازی سیستم خود کرده بود. در سال ۱۸۸۱ همان سرمایه‌داران پشتوان وی شرکت تازه‌ای با نام Edison Electric Illuminating Company of New York تأسیس کردند. از مقامات شهر اجازه گرفته شد تا در زیرزمین کابل‌گذاری شود بویژه در این کار از آخرین دستاوردها به بهترین وجهی استفاده شد. نیروگاه مرکزی در ۲۵۷ - ۲۵۵ پرل استریت در محله بانکها، دفاتر و کارگاههای کوچک، حوالی

جنوب مانهاتن برپا شد. ادیسن پنجاه بار هم نوع تازه‌ای از دینام، *Jumbo* را ترکیب کرد که شش عدد از آن را یک ماشین بخار به‌کار انداخت. وی پیش‌بینی کرده بود که یک نیروگاه می‌تواند بین ۲۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ خانه را برق دهد. اما زمانی‌که نخستین نیروگاه در اول سپتامبر ۱۸۸۲ گشایش یافت بیش از ۸۵ مشتری نداشت و تنها ۴۰۰ لامپ را روشن ساخت. هزینه ساخت این نیروگاه از ۶۰۰۰۰۰ دلار هم فراتر رفت.

مردم نیویورک با تردید زیاد به این وسیله جدید روشن‌سازی روی آوردند. ادیسن را تحسین می‌کردند اما به گاز دلبسته بودند زیرا از مدت‌ها پیش ارزانترین وسیله بود. با این‌همه، ادیسن به تصاحب قاره قدیم روی آورد.

در سال ۱۸۸۱ شرکتی با سرمایه‌گذاران انگلیسی تأسیس کرد که به اشاره دانشمندان انگلیسی، نظیر جان هاپکینسون و امبروز فلمینگ<sup>۱</sup> برپا کردن نخستین نیروگاه را در هالبرن<sup>۲</sup> آغاز کرد. وی به سال ۱۸۸۲ در نمایشگاه برق کریستال پالیس<sup>۳</sup> شرکت کرد و سیستم خود را برای استفاده مردم عرضه داشت.

ادیسن در آن زمان با رقابت شرکت سوان برخورد کرد. این شرکت از سیستم سنتی یک مولد برای هر خانه یا تأسیسات خصوصی یعنی همان سیستمی استفاده کرد که ادیسن هم به مشتریان خود حتی در امریکا پیشنهاد کرده بود. در ابتدا آثاری از کشمکش میان دو شرکت پدید آمد اما گفت‌وگو برای یکی شدن این دو شرکت به میان آمد. این گفت‌وگو چند سال به درازا کشید، زیرا ادیسن، برای نام رسمی شرکت، به نام دیگری جز شرکت خود رضایت نمی‌داد. او یادآوری می‌کرد که وی تنها مخترع - نه تنها لامپهای فروزان - بلکه سیستم کامل تولید و توزیع برق است. سرانجام تنها در سال ۱۸۸۸ بود که توافق ایجاد شد و شرکت تازه با نام Edison and Swan United Electric Company Ltd خوانده شد.

رقابت‌های سوان و ادیسن: طی سالهای ۱۸۷۸ - ۱۸۸۲ دو پایه‌گذار این اختراع مواردی از رقابت داشته‌اند. هر دو موفق به ارائه مدلی از لامپ تخلیه شده از هوا شدند که گاهی همراه سیستمی کم‌ویش پیشرفته از توزیع بودند و در همان زمان محصولات آنان با نوعی کنجکاوی مواجه می‌شد و لافل طی چند سال زمینه‌ای از کاربرد یافتند. از میان آنهایی که ذکر شده‌اند می‌توان از یک شرکت انگلیسی Saint George Lane-Fox و یک امریکایی Hiram Maxim نام برد.

۱. Fleming Ambrose (۱۸۴۹-۱۹۴۵): مهندس انگلیسی برق، استاد الکتریسته در دانشگاه‌های انگلستان - م.

۲. Holborn: ناحیه‌ای در شمال شرقی اسکاتلند - م.

شرکت لین - فاکس افروزه های خود را با الیاف گیاهی تولید می کرد، که گاهی بید گیاه بود که آن را تحت تأثیر نوعی وولکانش، اکسی کلرور روی و گوگرد قرار می داد. تخلیه هوای لامپ با شیوره آلورنیا<sup>۱</sup> بود که بر پایه ایجاد یک خلأ با رومتری به کمک دستکاریهای پیایی انجام می شد و بوسیله آن نتایجی در ردیف نتایج شیوره اسپرنگل به دست می آمد. در کار این دستگاه نیز چندین ظریفکاری بود تا گازهای محتوی زغال بیرون رانده شوند و افروزه به سیمهای برق اتصال یابد - و این خود کار بسیار دقیقی برای ساخت هر لامپ بود. وی همچنین نوعی تنظیم شدت روشنایی را پیش بینی کرده بود تا دارنده چراغ نفتی در تعویض آن با لامپ برقی تردیدی به خود راه ندهد، زیرا نور این لامپ هم می توانست کم و زیاد شود.

هایرم ماکسیم ورقه ای را که به شکل U دوگانه یا M قالب زده شده بود می سوزانید و با گذراندن جریانی از اتر نفت، عمل آوردن آن را کامل می کرد. این رسوب هیدروکربنی سبب می شد که افروزه، پایداری فیزیکی بیشتری داشته باشد. مقاومت لامپ ماکسیم بین  $50\ \Omega$  تا  $60\ \Omega$  و از مقاومت لامپ لین - فاکس  $75\ \Omega$  تا  $105\ \Omega$ ، کمتر بود. هر دو نوع لامپ عمری تقریباً برابر و حدود ۳۰۰ ساعت داشتند.

اما لین - فاکس گویا نتوانست برای تبلیغ محصول و سیستم خود پشتوانه مالی لازم را به دست آورد، و نیز پشتوانه مالی ماکسیم به اندازه پشتوانه مالی ادیسن کامل نبود. ماکسیم با وجود اقدامات تولیدی تا حدودی قابل توجه که در امریکا و اروپا انجام داد شهرتی درازمدت به دست آورد؛ اما نه در رشته برق بلکه در قسمت مسلسل سازی.

آقای لوسین گولار کمی بعد ناچار شد انواع فروزنده و تخلیه ای را در لامپی با یکدیگر تلفیق کند که با جریان متناوب کار می کرد. چنین لامپی برای نخستین بار، یک افروزه کربنی شبیه افروزه های لامپهای دیگر را، با دو الکتروود پلاتینی که جدا از یکدیگر کار گذاشته شده بودند. و نیز الکتروود دیگری، مجتمع ساخته بود و در محیطی خلأ شده، در اثر تغذیه از خروجی یک ترانسفورماتور، تخلیه برقی ایجاد می شد؛ ورودی این ترانسفورماتور با افروزه در مدار شده بود.

گرم کردن قبلی و افروزه های فلزی: از جمله نوآوریهای دیگر پایان این سده در رشته روشن سازی با برق، لامپی است که آقای و. زرنست فیزیکدان آلمانی آن را طرح، و بوسمان<sup>۲</sup> از آ. ا. گ. برلین آن را تولید کرد و بدین ترتیب در آغاز سال ۱۸۹۷ شهرتی به دست آورد. این، لامپی بود که افروزه آن که رشته نازکی از اکسید فلزی بود، بنا به طرحی از یابلوچکوف، قبلاً گرم می شد. آقای بوسمان به جای مخلوط نخستین اکسید توریم، اسید و اکسید دیتیریم، قلیایی، افروزه ای از منیزیم به کار برد

که بوسیله یک افروزه کمکی از پلاتین یا با دو لامپ کوچک فروزنده گرم می‌شد تا رسانایی آن افزایش یابد. زمانی که این افروزه به آستانه‌ای از دما می‌رسید افروزه منیزیمی در اثر گذر جریان برق  $2000^{\circ}\text{C}$  گرم می‌شد و در هوای آزاد می‌درخشید. این وسیله گرم کردن را پس از اشتعال منیزیم خارج می‌کردند. این لامپ نرنست با اینکه اجبار تخلیه هوا برای آن نبود به علت دشواری ساخت و کار کردن با جریان متناوب در سال ۱۹۱۰ از دور خارج شد، گرچه در کتابهای فیزیک تا مدتها از آن نام برده می‌شد.

افروزه کربنی ادیسن و سوان در سالهای ۸۰ مصرف‌کنندگان را غافلگیر کرده بود؛ اما زمانی که کاربرد آن رواج یافت و به آن عادت شد معایب آن به فهرست درآمد: شکستگی افروزه کربنی و درخشندگی کم لامپ. دمای افروزه از  $1600^{\circ}\text{C}$  نمی‌گذشت و نور شیویره اوثر برای روشن‌سازی با گاز، زردی کمتری می‌داد. کارایی افروزه کربنی با وجود این معایب، لااقل برای بعضی از کارها، هنوز هم کاربرد دارد.

فیزیکدانان آن زمان برای بازگشت به افروزه‌های فلزی تلاش می‌کردند. آنان پلاتین را به علت بهای گزاف آن رها کردند و به فلزات کمیاب: اسمیم یا «تانتال» روی آوردند، زیرا آنها را بهتر می‌شناختند و نیز به تنگستن و مولیبدن، که آنها را آزموده بودند. این فلزات می‌توانستند در خلأ تا دمایی بالاتر از دمای افروزه کربنی پیش بروند و بسته به نوع آنها از  $1900^{\circ}\text{C}$  تا  $2200^{\circ}\text{C}$  درجه گرم می‌شدند. گرایش به ساخت افروزه‌های ظریفتر، به ضخامت یک موی بود. بعداً به ترتیب در حدود سال ۱۸۹۸ آقای اوثر فون ویسباخ افروزه‌های اسمیمی، و آقای و. بولتن در ۱۹۰۳ از تانتال و آقای یوست<sup>۱</sup> و هانامان<sup>۲</sup> در ۱۹۰۴ از تنگستن ساختند. تولید آن یا با استفاده از منجر (حدیده مفتولکشی)، یا با گذرانیدن خمیری از میان یک الماس انجام می‌گرفت. این کار مستلزم ظریفکاریهایی بود. آقای و. د. کولیج در سال ۱۹۱۲، به‌هنگام کار روی لامپهای تخلیه‌ای که به نام وی شهرت یافته است، روش چکشکاری گرم را بنیان گذارد و با آن توانست تنگستن را برای مفتولکشی آماده سازد و سیمهای بسیار ظریفی تهیه کردند.

بازده این افروزه‌ها بسیار بالاتر از افروزه‌های کربنی بود. افروزه کربنی برای تولید هر شمع اعشاری ۳/۵ وات مصرف می‌کرد و حال آنکه افروزه‌های فلزات مصرفشان ۱/۲ وات بود. اما دشواری تازه‌ای رخ نمود: افروزه‌های فلزی برخلاف نوع کربنی آنها در حالت سرد مقاومت الکتریکی بسیار کمتری از حالت گرم داشتند. در لحظه روشن شدن جریانی که مصرف می‌کردند هفت برابر کار معمولی آنها بود، و بدین ترتیب، در صورت روشن شدن همزمان شمار زیادی از لامپها، یک

مشکل فنی ایجاد می‌شد.

در برهه زمانی ۱۹۰۵ تا ۱۹۱۴ کاربرد لامپهای با افروزه تنگستنی به نوعی رواج کلی دست یافت. نور آنها سفیدتر از نور افروزه کربنی و به نور طبیعی نزدیک بود.

مزایای دیگر این لامپها مشخص شدند که از آن جمله امکان ساخت آسانتر لامپهای قوی ۵۰۰ شمعی با سیمهای اتصالی نازکتر بود. کار آنها با ۲۲۰ ولت آسانتر بود.

نظریه فروزندگی: در آغاز سده بیستم، نظریه روشن‌سازی با فروزندگی، دیگر مبانی علمی خود را یافته بود. کارهایی که در دهه‌های پیش از آن در زمینه پژوهشهای تجربی و نظری درباره مسأله تابش انرژی در چارچوب پیشرفت ترمودینامیک انجام گرفته بود، به تعریف سیه جسم و اطلاعات اولیه آقای کیرشهوف درباره تشعشع آن انجامید و کمی بعد، به کشف قانون یوزف استفان در ۱۸۷۹ (مجموع انرژی صادر شده متناسب است با دمای مطلق به قوه چهار) و نیز قانون ویلهلم دین<sup>۱</sup> سال ۱۸۹۳ که قانون استفان را با به حساب آوردن توزیع انرژی بر طبق طیف طول موجها تکمیل می‌کرد کمک کرد. این اطلاعات علمی از صدور نور، کاربرد کربن را برای استفاده از قدرت بیشتر صدور نور، بهتر از فلز نشان می‌داد. باین‌حال، فلزات که رسیدن به دماهای بالاتر را ممکن می‌ساختند، عیب دور شدن از شرایط سیه جسم را تا حدودی جبران می‌کردند.

کارهای لنگمیر: از آغاز دهه نخست سده بیستم، اطلاعات علمی منظم‌آ افزایش می‌یافت. یکی از پژوهشگرانی که نخستین تغییرات بنیانی صنعت تولید لامپهای فروزان را سبب شد، آقای اروینگ لنگمیر فیزیک‌شیمیدان بود. بسیار جالب است که نتایج عملی که وی بداند دست یافته بود به دنبال یک رشته پژوهشهایی بود که بدون نقشه قبلی، هدف معین و در کمال آزادی انجام شده بود؛ گرچه در آزمایشگاهی عملی شدند که شرکت جنرال‌الکتریک در سال ۱۹۰۱ آن را تأسیس کرده بود. این امر محتملاً از نمونه‌های بسیار پیش‌رس یک رشته تحقیقات علمی است که بدون هیچ‌گونه الزامی از سوی مقامات بالا در آزمایشگاهی انجام گرفته است که یک شرکت صنعتی، هزینه‌های آن را عهده‌دار شده بود و در پرتو آن تحقیقات، شرکت مزبور سود کلانی برد. خود آقای اروینگ لنگمیر گفته است که در آغاز تحقیقاتش در سال ۱۹۰۶، هیچ‌گونه اندیشه برنامه‌ریزی که برای کارفرما ایجاد سود کند در سر نداشته است. اما وی هیچ‌گونه دستوری دریافت نداشت و بهتر دید که در رشته‌ای به‌کار خود ادامه دهد که آقای والتر نرنست، به‌عنوان استاد راهنمای وی برای رساله دکترای در گوتینگن درباره تفکیک گازها در اثر کنتاکت سیمی از پلاتین که از گرما سرخ شده W. Wien. ۱۸۶۴-۱۹۲۸ فیزیکدان آلمانی که در سال ۱۹۱۱ بدلیل تحقیقاتش روی تشعشع انرژی از جسم جایزه نوبل دریافت داشته است-م.



بود، انتخاب کرده بود، در اینجا ما با نوعی تداعی اندیشه بین لامپ نرنست، که در زمان اشتغال، نخست تنها یک وسیله منفرد و دارای عمر کوتاه بود و گسترش مطالعاتی که نتایج صنعتی بزرگی در پی داشت روبه‌رو هستیم.

بدین ترتیب، لنگمیر با ابتکار خود در سال ۱۹۰۶ کار تحقیقی خود را درباره تشکیل اکسید نیتروژن بر اثر وجود هوای محبوس در یک لامپ بسته و مجهز به یک رشته سیم داغ شده در اثر جریان برق آغاز کرد. سپس شش سال بعد به ایجاد تعادل مخلوطهای گازی در دمای بالا و فشار کم علاقه‌مند شد. لامپ تجربی وی ساده بود و به لامپی از نوع فروزنده مغازه‌ها شباهت داشت. لنگمیر بدین ترتیب در پی یافتن علت کوتاهی عمر افروزه، حتی از نوع فلزی آن در یک لامپ برآمد. وی پذیرفت که علت این امر وجود گازهای مانده در لامپ، علی‌رغم گرم کردن افروزه در خلأ، پیش از بستن لامپ است، زیرا این گازها به جدار داخلی شیشه و چند ناخالصی اجتناب‌ناپذیر می‌چسبند.

آقای لنگمیر این نتیجه را گرفت که تحقق یک خلأ کامل، هدفی دسترس‌ناپذیر است و نیز چنانچه به جای ایجاد خلأ، محفظه را با گاز خنثی، بویژه مخلوطی از آرگون و نیتروژن پرکنیم افروزه دیرتر متلاشی، تابندگی آن بیشتر، و عمر آن زیاده‌تر می‌شود. دمای لامپهای محتوی گاز خنثی به  $2500^{\circ}\text{K}$  می‌رسد. بنابراین شیوه خلاسازی کارگاههای تولید لامپ، کنار گذاشته شد.

لامپهای دارای اتمسفر خنثی، گرچه در سال ۱۹۱۳ به بازار آمدند رواج کلی آنها در سالهای ۲۰ بود. این لامپها به علت وجود گاز در آنها، متحمل تلفات ناشی از کنوکسیون (گرمای ناشی از همرفت) می‌شدند. آقای لنگمیر باز این پدیده را، و نیز پدیده تبخیر تنگستن را بررسی کرد. وی پذیرفت که تلفات ماده در واحد سطح، برای افروزه‌های ظریف و افروزه‌های ضخیم، برابر است. با این همه، ظاهراً افروزه‌های ضخیم، با مصرف برابر انرژی، تابندگی بیشتری دارند. این فیزیکدان آمریکایی، به جای افروزه‌های راستخطی معمول تا آن زمان، افروزه‌های مارپیچی را به کار گرفت. بعدها در سال ۱۹۳۶ از افروزه‌های دو مارپیچی استفاده کرد که سیم‌پیچی بوبینی از افروزه مارپیچی بودند.

تحقیق درباره ترکیب جو موجود در لامپ، شکلها و محلهای افروزه، شکل خود لامپ و دستکاری سطح آن، مات بودن، آینه‌ای بودن و... پس از وی نیز ادامه یافت، و این چشمه ملتهب نوری باز هم پیشرفتهای پراهمیتی داشت.

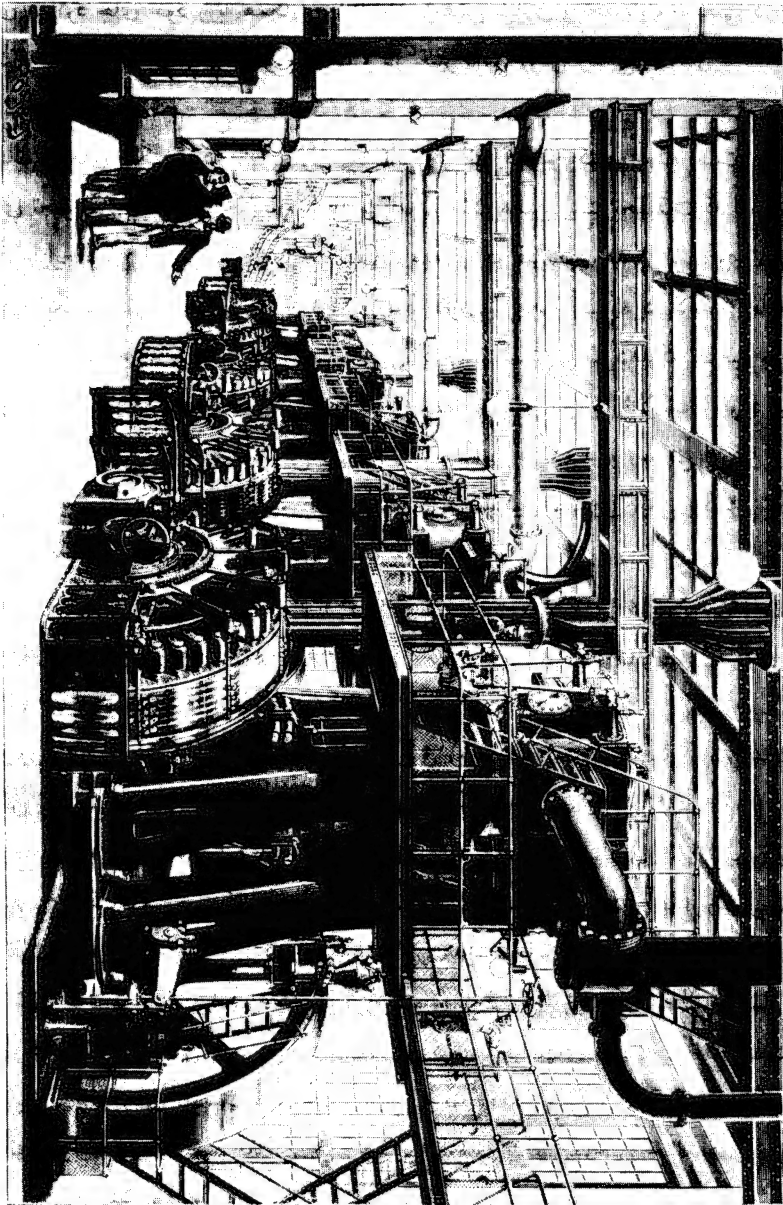
همه این رشته بررسیها، از زمان آقای ادیسن و همدوره‌های وی تا کارهای آزمایشگاهی معاصر،

شاهد‌گویایی هستند که چگونه الهام برخاسته از قدری معلومات فیزیکی که آزمایشگری پراگماتیک را رهبری می‌کرد جای خود را به همکاری تنگاتنگ پژوهش بنیادی و تحقیقات صنعتی در جهت پیشرفت رشته‌ای از خلاقیت واگذارده است و در تغییر دادن روش زندگی مردمان سده ما تأثیر داشته است.

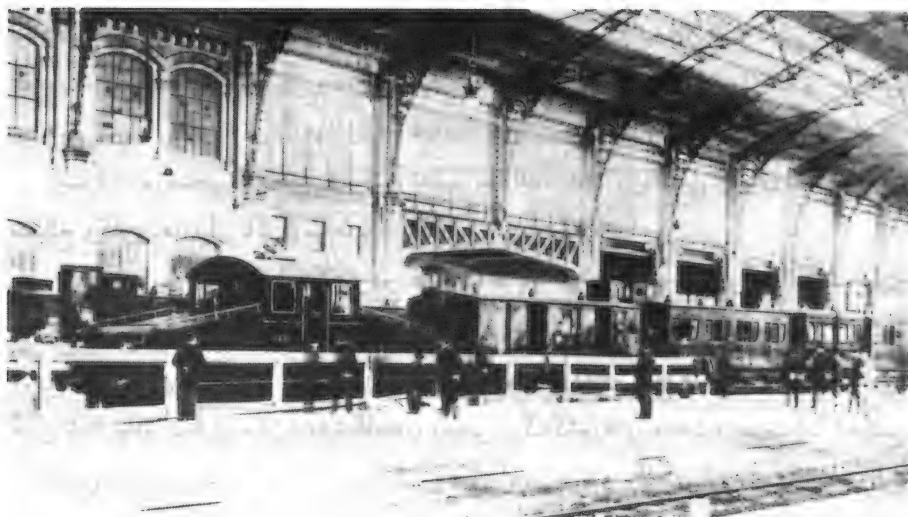
دنباله کارهای لنگمیر که تنها عنوان چندتایی از آنها در این کتاب آمده است چگونگی جهشهای تحقیقاتی به‌سوی مراحل تازه را باز می‌نماید. مثلاً، همین رشته تحقیقات که لامپهایی از نوع دیگر را ایجاد کرد این فیزیکدان را به کشفیات دیگری در فیزیک رهنمون شد. وی فرسایش افروزه‌های تنگستنی را با مکانیسم زیر توضیح داد. ذراتی از بخار آب که در لامپ تخلیه شده هستند در اثر گرما تجزیه می‌شوند. اکسیژن تشکیل اکسید تنگستن را می‌دهد که تصعید می‌شود؛ هیدروژن به هیدروژنهای اتمی تفکیک می‌شود که با اکسید تنگستن در دیواره لامپ برخورد می‌کنند و به‌علت فعالیت افزایش یافته شیمیایی، از نو آب را تشکیل می‌دهند و رسوبی از فلز بر جای می‌گذارند. چرخه آب در همه مدت عمر لامپ ادامه دارد. تشکیل هیدروژن اتمی به‌دنبال شکستن مولکول آن به تکنیک نوینی در جوشکاری انجامید.

بخشی از هیدروژن مولکولی در اثر وجود قوس برقی بین الکترودهای تنگستن که به‌سوی محل جوشکاری روانه شده‌اند در برخورد با دیواره سرد از نو به مولکولهای هیدروژن تغییر شکل می‌دهند و مقدار زیادی گرما را واگذار می‌کنند.

لامپها و روشنایی: با شروع دوره‌ای که روشنایی برق رواج کلی گرفت، خودکار روشن‌سازی هم دستخوش تغییر شکل قابل توجهی شد. در حقیقت این کار در سالهای ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ به دوره متحولی گام گذارد و هنوز هم با همان آهنگ پیش می‌رود. مخترعان سالهای ۱۸۸۰ برای تشویق توده مردم برای به‌کارگرفتن ثمره کارشان، آویزها و جارهایی اندیشیدند که شکل آنها از وسایل گازی یا نفتسوز تقلید شده بود. بعدها، زمانی که چشمه‌های نوری فراوانتر و تولید آنها بیشتر شد، رابطه بسیار شناخته شده ظرفیت تولید و انگیزه تقاضا، گروه تازه‌ای از فن سالاران و کارشناسان روشن‌سازی را پدید آوردند و از آن قوانین بزرگی ایجاد کردند. این گروه بر دانشهای نورسنجی تکیه داشتند که در سده پیش تا اندازه‌ای به‌دست آمده بود. آنان رفته‌رفته جمع مهمی را تشکیل دادند که بحث درباره آنها در اینجا ممکن نیست. این جمع همان اندازه که بدلیل ساختن چشمه‌های نوری، به معنی دقیق کلمه ممتاز بود، با رفتارهای خود نیز شناخته می‌شد. هر دو تحول در دوره‌ای بستگی نزدیکی با یکدیگر داشتند.



تابلوی ۱۷. نیروگاه بارانداز زمباب، در پاریس (۱۸۹۵-۱۸۹۶).



تابلوی ۱۸. لوکومتیو برقی P. O. (۱۹۰۰).



تابلوی ۱۸ مکرر. لوکومتیو برقی با بیشترین سرعت در جهان، ۲۴۳ کیلومتر در ساعت (۱۹۵۴).

در مورد وسایل انتشار یا انعکاس نور، بر آن بودند که لامپهای نوینی بسازند، و نیز برعکس، به نیازهای کاربردی نور مصنوعی، که اینک تنوع فوق‌العاده‌ای یافته بود، از محل کار و سکنی، سالنهای عملیات، آزمایشگاهها، ویتروینهای مغازه‌ها گرفته تا روشن‌سازی سالنهای اجتماعات و چراغانی، روشنایی سالنهای بزرگ، فرودگاهها، ایستگاههای راه‌آهن، چهارراهها و غیره، بتدریج پاسخ گویند. پیشرفت نورسنجی صنعتی، همچنین تنظیم مقاوله‌نامه‌های بین‌المللی را برای استاندارد کردن مصالح و کاربردهای آن ناگزیر ساخت.

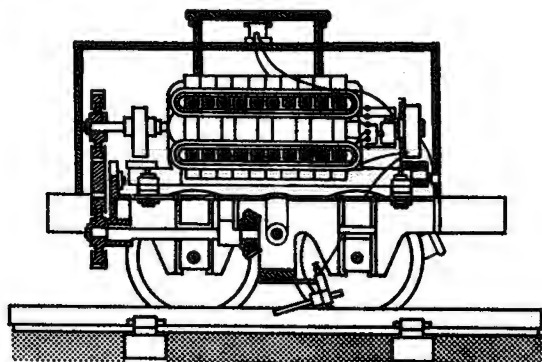
ادیسن سرپیچ لامپ را طرح کرد و در آغاز سدهٔ ما پایهٔ میخی لامپ به بازار آمد. استانداردسازی دیگری در سال ۱۸۲۹ استانداردهای فنی دیگری: اندازهٔ ته لامپ و خود لامپ، جای این چشمه نوری، توان اسمی و غیره را معرفی کرد، و بدین ترتیب، اندازه‌های واحدها برای مدل‌های گوناگون تعیین شد. توافق دیگری میان آزمایشگاه‌های رسمی بزرگ کشورهای متعدد و تصمیمات کنفرانس بین‌المللی اوزان و مقادیر نیز از سوی دیگر به عمل آمد. تعریف یکاهای نورسنجی، شدت نور، درخشانی، شار درخشانی، روشنایی و غیره که برخی از آنها مانند «شمع» معروف، بسیار گوناگون تعریف می‌شد، معین شدند.

بنابراین، دیده می‌شود که نتایج متعدد راه افتادن عملی روشن‌سازی با برق، پس از اختراع دینام تا چه اندازه گسترده بوده است.

### کشش روی خط آهن

صرف‌نظر از شیمی و متالورژی، باید گفت که پس از روشن‌سازی، موضوع کشش قطار روی خط آهن، یکی از نخستین عوامل موفقیت برق صنعتی بود. نمی‌توان انکار کرد که امکان برگشت‌پذیری دینام گرام که آقای ۱. فونتن آن را به سال ۱۸۷۳ ثابت کرد، مسألهٔ ماشینهای گردان مگنتی یا دینامی را بکلی تغییر شکل داد. کاربرد واقعی الکتروموتور، آن‌هم برای نمایش، تنها شش سال بعد، یعنی سال ۱۸۷۹، پس از کوششهای تجربی و بدون موفقیت آقایان فلیکس و کرتین<sup>۱</sup>، بویژه ساخت یک تراموای کوچک که با برق حرکت می‌کرد و کارخانهٔ زیمنس - هالسکه، به مناسبت نمایشگاه صنعتی برلین، آن را ساخته بود، انجام گرفت.

در زمان ما اصطلاح تراموای دلیل بر نوعی کشش بوسیلهٔ موتور برقی است؛ اما در سال ۱۸۸۰ این اصطلاح که از مدتها پیش رواج داشته است، بویژه اشاره بر خطوط آهن مستقر روی راههای شوسه می‌کرد و وسایل حمل‌ونقل عمومی که اسبها آنها را می‌کشیدند روی آنها حرکت می‌کردند.



شکل ۶۵. لوکوموتیو برقی زیرینس و هالسکه (۱۸۷۹).

برش طولی، در بخش بالایی، موتور دیده می‌شود؛ انتقال حرکت به توسط چرخنده‌ها در قسمت چپ بخش بالایی است. تغذیه برقی از ریل در بخش پایینی دیده می‌شود.

اومنیوس‌هایی که روی ریل حرکت می‌کردند در آن زمان امکاناتی برای حل نخستین مشکلات راه آهن شهری، که چند سال بعد اتوبوسهای برقی روی آنها به حرکت درآمدند فراهم آوردند. این کاربرد، مردم را دلگرم کرد و در نتیجه پیشرفت آن تضمین شد. آنان حتی پیش از کاربرد موتورهای ثابت صنعتی و موتورهای خودروها، نوعی جنبش تجهیزاتی را، ابتدا در داخل شهرها، سپس در کمتر از ۲۰ سال در منطقه روبه‌راه کردند. این جنبش طرح اولیه فنون حمل‌ونقل و نیز توزیع جریان را در فواصل زیاد ممکن ساخت. در واقع می‌توان دید که این نمایشها، با رونق محدود، پس از مدت کوتاهی منجر به ساختن خطوط آهن با کشش برقی شدند. جریان برقی کردن با آهن‌گی کم‌ویش منظم، هنوز هم ادامه دارد.

گامهای اولیه این جنبش: در مورد کشش با برق برای خدمات شهری، چنین می‌نماید که دشواریها پس از اندک زمانی برطرف شدند.

نمایش زیرینس و هالسکه در سال ۱۸۷۹ نخستین کار در این راه بود (شکل ۶۵). طبیعی است که مانند همیشه، این کار سوابقی داشته است که روایتها - اگر نه افسانه‌هایی - را کم‌ویش دامن زده‌اند. از آن میان می‌توان از کار آقای تامس دونپورت به سال ۱۸۳۴ در ممالک متحده امریکا، و نیز حرکت آقای رابرت دیویدسون در ۱۸۳۸ در اسکاتلند و بالاخره نمایش چارلز پیچ در ۱۸۵۰ باز در ممالک متحده امریکا نام برد که گویا موفقیت بیشتری داشته است و چندین

کار دیگر در دهه‌های بعد، در کشورهای دیگر. اما در ثبت اختراع این کار هم، مانند پیش از آن، مطلبی درباره ساخت و آزمایش نیامده است و برپایه آنچه که از منابع جریان صنعتی پیش از سال ۱۸۷۲ - ۱۸۷۰ به دست ما رسیده است ما می‌توانیم یقین کنیم که همه این کارها به شکست انجامیدند.

در این مورد ما در موقعیتی هستیم که هم‌اکنون با آن آشنا شدیم. سطح تکنیک باید آن اندازه بالا باشد که نوآوری بتواند به بهره‌برداری تجاری بیانجامد. از موقعیتهای اقتصادی سخنی نرفته است زیرا در واقع، آنها زیاد شناخته شده نیستند اما می‌توان از این لحاظ فرایند زیر را توضیح داد: در مراحل نخست، سودآوری حمل‌ونقل شهری، بویژه در شهرهای بزرگ، اصولاً شهرهای بعضی ایالت‌های ممالک متحده، یا پرجمعیت، مثل شهرهای اروپا؛ در مراحل دوم، کشش سرویس، معادن و کارخانجات، ایستگاههای قطار، خطوط مونتاز، سپس برای حومه و سرانجام خطوط بزرگ، حتی پیش از جنگ جهانی اول در اروپا.

راه‌لحای اولیه: راه‌آهنهای کوچک و نمایی این مؤسسه آلمانی نوسازی شدند و بویژه پس از بروکسل، وین و لندن؛ و در پاریس به مناسبت نمایشگاه برق سال ۱۸۸۱. در این زمان از حرکت قطارهای کوچک نوع «باغ وحش»<sup>۱</sup> دو سال گذشته بود. خودروها که ناگزیر براساس مدل اومنیبوس‌های امپراطوری آن زمان ساخته شده بودند می‌توانستند ۵۵ نفر را با سرعت ۷۵ کیلومتر در ساعت جابه‌جا کنند. سرعت آن به علت اینکه از محله بسیار شلوغ، از کنکورده به پاله دولند و ستری نمایشگاه می‌گذشت از ۱۷ کیلومتر در ساعت بیشتر نبود. دشواریهای گوناگونی در برابر سازندگان این راه قد علم کرده بودند. آنان می‌بایست در جاده خاکی ریل را در شوسه جاسازی کنند و چون گل بسرعت آن را می‌پوشانید نمی‌توانست به سیم رابط برگشت کمک کند. آنها می‌بایست تغذیه را به کمک دو سیم رابط هوایی و نیز کنتاکتهایی تأمین کنند؛ زمانی که به پیچیدگی کار قرقره‌های کلاسیک کنتاکت، که کار آنها در تعدادی از شهرهای جهان هنوز رضایت‌بخش است بیندیشیم: لوله‌های برنجی که از طول چاک زده شده‌اند و میله‌ای به شکل ماکو، که غلتکی آن را فشرده کرده، همراه فنرها، طنابهای کشش و سیمهای اتصال در آن می‌لفزید؛ جای شگفتی دارد.

به هرتقدیر، زیمنس و هالسکه با سهولت تمام مسأله تغذیه موتور الکتریکی خود را حل کردند: ریل مرکزی خط در سال ۱۸۷۹، سیم رابط هوایی یا ریل خط در ۱۸۸۱، و نیز تعبیه‌های گوناگون مربوط به انتقال انرژی موتور به چرخها و شرایط راه‌اندازی و ترمز. این موتور، که یک دینام ساده بود، بین دو آکسل طوری گذاشته می‌شد که محور موتور موازی آکسلها قرار می‌گرفت. انتقال حرکت با

۱. در این قطارها، انسان و حیوان، مجتمعاً مسافتهای کوتاهی را طی می‌کردند. - م.

کمک تسمه‌هایی انجام می‌شد که از شیاری که در لاستیک دور چرخ ایجاد شده بود می‌گذشتند. سیستمهای دیگری نیز در سال ۱۸۷۹ آزمایش شدند، محور این موتورهای عمود بر آکسلها بود و انتقال حرکت بوسیله چرخدنده انجام می‌گرفت. نوعی روستا که روی توپهای کنتاکت آن یک دسته جابه‌جا می‌شد تا راه‌اندازی تدریجی ممکن شود، وسیله سرعت و ترمز، که طبعاً از نوع معمولی بود.

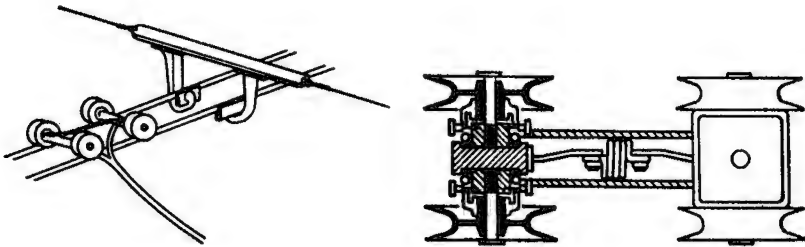
بدین ترتیب، همه دشواریهای کشش برقی بسرعت برطرف شدند. تراموای برای خدمات شهری بود و با ظاهری پیش پا افتاده کار خود را شروع کرد. زمینس و هالسکه در ماه مه ۱۸۸۱ نخستین خط ۲۵۰ متری، که چند محله برلین را دور می‌زد افتتاح کردند. این خط با نام خط گروس لیشترفلده<sup>۱</sup> شهرت یافت. تا حدود سال ۱۸۸۶ خطوط متعددی در انگلستان، اتریش و سوئیس تأسیس شدند. تعجب ندارد که چندین خط از آنها در خدمت معادن بودند. در فرانسه، این نوآوری در سالهای بسیار بعد در ۱۸۹۰ در کلرمون - فران عملی شد.

از همان سالین نخست، برای رفع نواقص توزیع جریان برق با تجهیز خودروها با باتریهای انباره‌ای می‌اندیشیدند. در فرانسه، آقای نیکلا رافار<sup>۲</sup> آزمایشهای چندی انجام داد که بعضی از آنها درباره راهپیمایهای بدون ریل بود. وزن و حجم زیاد باتریها و نیز عمر کم آنها، مناسب کار برای توده مردم نبودند.

تکنیک امریکایی: سرانجام به کمک موتور با جریان مستقیم با ولتاژ ۵۰۰ یا ۶۰۰ بود که تراموای تقریباً در همه شهرها به حرکت آمدند. این سیستم را مهندسان امریکایی به طور قطعی به کار انداختند و به رواج آن در سالهای ۱۸۹۰ - ۱۸۸۵ در شهرهای امریکای شمالی دست زدند.

نخستین نمایشهای این وسیله در ممالک متحدۀ امریکا بوسیله ادیسن نخست در ۱۸۸۰ در منلو پارک انجام گرفت، سپس با همکاری آقای استفان د. فیلد<sup>۳</sup> که از امتیاز تقدم برخوردار بود، در سال ۱۸۸۳ بویژه در شیکاگو. این وسیله از نظر تکنیکی، نسبت به تراموای اروپا چیز تازه‌ای نداشت. اما نوعی رقابت بین چندین مؤسسه را سبب شد. مردم امریکا هنوز به استفاده از وسایل برقی خو نگرفته بودند، گرچه تأسیساتی در سال ۱۸۸۴ بوسیله آقای ج. هنری در کانزاس سیتی برقرار شده بود و آقای لئو دافت<sup>۴</sup> چند کیلومتر خط آهن بین بالتیمور و همپدن<sup>۵</sup> در سال ۱۸۸۵ کشیده بود و یک قطار کوچک برقی بوسیله س. ج. وان دپول<sup>۶</sup> در نمایشگاه تورنتو در همین سال به نمایش گذاشته شده بود.



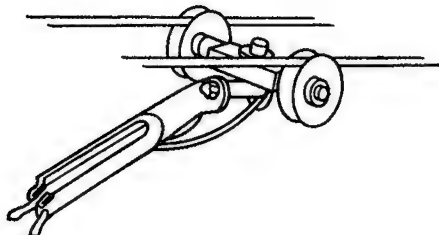


شکل ۶۶. چرخکی که در بالای سیمها حرکت می‌کند.

در سمت راست، نمایه و برش افقی. چرخهای دوطرف، مستقل از یکدیگرند. یک فنر مارپیچ دو جفت چرخها را به یکدیگر مرتبط ساخته است تا ناهمواری سیم رابط مستهلک شود.

این آزمایشها با همهٔ محدودیت خود، نتایج سودمندی داشتند که اخذ برق از سیم هوایی با یک چهارچرخه، که امریکاییها آن را trolley (و فرانسویها در همان زمان آن را trolet) نامیدند زیرا به چهار چرخ شیاردار مجهز بود و روی دو سیمی که موازی یکدیگر کشیده شده بودند حرکت می‌کرد (شکل ۶۶) از آن جمله است. بعداً روروکی با دوچرخ را آزمایش کردند که سیمهای برقدار از بالا بدان اتصال داشتند (شکل ۶۷). گفت‌وگو دربارهٔ این دو نوع بسیار بالا گرفت و درعین حال برای این روروکهای هوایی، سوزنها و تقاطعهایی گذاشته شد.

بالاخره نوع کنتاکت از پایین پیروز شد و آن را با تقلیل سیمها به یک سیم و یک چرخ که روی دو شاخهٔ گردنده‌ای سوار بود، ساده کردند. راه‌حل اخیر مستلزم برگشت جریان برق به توسط ریلی بود که اطاق روی آن حرکت می‌کرد. این روشی بود که این مؤسسه آلمانی در سال ۱۸۸۱



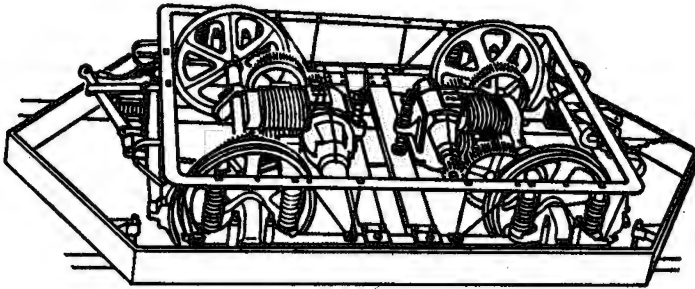
شکل ۶۷. چرخکی که در پایین سیمها حرکت می‌کند.

در پاریس، بدون موفقیت اجرا کرد. اما امریکاییها سیستمی برای تمیز کردن ریلهای برقدار که در زیر اطاق کار گذاشته می‌شد اندیشیدند. مشکل برقرسانی خط از فواصل دور بوسیله سیم اصلی را آقای وان دیول در مینیاپلیس و آقای فزانک ج. اسپراگ<sup>۱</sup> در ریچموند برطرف کردند.

دیده می‌شود که این آفرینش را، که نسبتاً سریع انجام گرفت نمی‌توان یک اختراع، به معنی دقیق کلمه، دانست. این نوعی نوآوری بود که در متنی از تکنیک با سطحی شایسته و با استفاده از راه‌حلهای هوشمندانه، برای اقتصادی کردن کاربرد آن، پدید آمده در آن زمان شهرهای امریکا، در واقع نوعی سیستم اجتماعی - اقتصادی را تشکیل می‌دادند که موفقیت نوآوریها را تضمین می‌کرد. این شهرها، که بسیار گسترده، با خیابانهای عریض و تقریباً همیشه مستقیم بودند شرایط خوبی برای تأسیسات و بهره‌برداری داشتند. تراموای برای شهرنشینان امریکایی می‌توانست از لحاظ سرعت و رفاه مسافران، نقطه مقابل راههای شوسه بسیار بد آنجا باشد.

موفقیت اسپراگ: آقای ف. ج. اسپراگ نخستین کسی بود که آینده این وسیله را تجزیه و تحلیل کرد و تصمیم به فعالیت در این کار گرفت. وی همراه با ادیسن برای چند سال کار کرد و بخشی از مغز سازنده وی شکل گرفت. وی شرکتی برای کار در ریچموند در ویرجینیا تأسیس کرد، این، نخستین خط تراموای بود که مسافت زیادی، حدود ۲۰ کیلومتر را می‌پوشانید. او راه‌حلهای موجود را فراگرفت و چند ابتکار شخصی بدانها افزود که مهمترین آنها آویزان نگاهداشتن موتورها بود. وسیله اسپراگ برای هر آکسل یک موتور داشت. هر موتور که محور حرکت‌دهنده آن موازی آکسل بود یکی از سرهایش بوسیله دو بالشتک روی آکسل تکیه می‌کرد و سر دیگر آن به کمک فنرهای فولادی از شاسی آویزان بود (شکل ۶۸). اتصال برقی آن به شکل کلاسیک و با فازهای زیر بود: راه‌اندازی دو موتور به شکل زنجیری، کوپلاژ موازی به‌هنگام افزایش سرعت، سپس شنت کردن (انشعاب دادن) القاگرها برای دست یافتن به حداکثر سرعت.

به‌طورکلی آقای اسپراگ وسیله بسیار زمختی را طرح‌ریزی کرده بود که در آن شرایط بد، سالیان درازی روی خاک، ناشی از وضع خراب شوسه و انقلابات جوی، دوام آورد. او همچنین سرویس سریعی برای آن پیش‌بینی کرده بود و زمانی که خط وی در فوریه ۱۸۸۸ گشایش یافت ۴۰ دستگاه در اختیار داشت. مردم همان‌طور که در برابر نوآوریهای تکنیکی متعددی عمل می‌کردند در این مورد هم یکباره به آن روی آوردند و همه مؤسسات که در آن زمان کار خود را منحصر به ساختن ماشینهای الکتریکی کرده بودند: وستینگهاوس، تامس - هوستن، ادیسن به کار تراموای روی آوردند. خط ریچموند بزودی اهمیت تاریخی یافت.



شکل ۶۸. موتور با چرخ وسط (بوجی) تراموای اسپراگ.

موتورهای برقی آویزان دیده می‌شوند. یک سر هر موتور روی فتری عمودی که روی بازویی تکیه کرده است، قرار دارد.

... و نتایج آن: این پیشرفت در ممالک متحده آمریکا سریع بود. از همان آغاز کار، اطاقهای تراموای چنان راحت بودند که هیچ وسیله دیگری آن‌طور نبود؛ تکانها حذف شده بودند؛ روشنایی و گرمای برقی همراه با سرعت حرکت برای تشویق مردم. این وسیله، یک معجزه واقعی بود و شگفتی‌آور نیست که تراموای همچون جالبترین اختراعات پایان سده شناخته شود. سده‌ای که اختراعات آن بیش از سده‌های پیش بود. در کمتر از ۱۰ سال، حدود ۲۳۰۰۰ کیلومتر خط گذاشته و نزدیک به ۴۰۰۰۰۰ اتاق ساخته شد. این آغاز خشن نتایج سریعی برای ساختار صنعت برق آمریکا داشت. شرکت‌های کوچکی که حول مبتکران منفرد تشکیل شده بودند بسرعت بوسیله گروه‌ها مالی با سابقه‌تر، برانش، وان دپول بوسیله تامسن-هوستن، اسپراگ بوسیله ادیسن جذب شدند. سپس دو تا از سه تا بزرگترین شرکت‌های آن زمان تامسن-هوستن و ادیسن در سال ۱۸۹۲ در یکدیگر ادغام شدند و شرکت جنرال الکتریک را تشکیل دادند. تجهیزات تراموای شهری آمریکا با این جنبش تمرکزگرایی بهتر شدند، اما تنها علت این نبود. بهره‌گیری از نیروهای متحرک به شکل برق، حمل و توزیع آن مستلزم سرمایه‌گذاریهایی بزرگ بود. شرکت جنرال الکتریک به محض تشکیل آن پس از ادغام، خود را مالک نیمی از اختراعاتی یافت که از سال ۱۸۷۷ به بعد برای استفاده از برق به ثبت رسیده بودند. بزرگترین رقیب این شرکت، وستینگهاوس بود. همچنین حتی پیش از آنکه عصر برق صنعتی به‌طور واقعی آغاز شود، شرکت‌های سرمایه‌دار آمریکایی، آینده این صنعت را، تنها در کشور خود، که از طریق عوامل اروپایی خود در سراسر قاره قدیم در دست داشتند.

رواج کلی تراموای: خود این وسیله اروپا را با وجود ابتکارهای پیشرس صنعتگران آن قاره، به آهستگی در نوردید. پیشاپیش همه، آلمان، بعد فرانسه (نخستین تراموای با برق انبارهای در پاریس در سال ۱۸۸۸ دیده شده است)، انگلستان و ایتالیا نخستین کشورهایی بودند که با آن مجهز شدند و بالاخره دیگر کشورها نیز از آن بهره گرفتند. در آن سوی اروپا، همه شهرهای بزرگ کشورهای مستعمره، از نظر سیاسی یا اقتصادی، طی یک دهه از آن برخوردار شدند. دیده می‌شد که در خیابانهای آنها تراموای در حرکت است بدون اینکه هیچ‌یک از مسائل این تکنیک جدید را حل کرده باشند. در برتری اخذ برق از ریلی که در خاک کار گذاشته شده است یا سیم هوایی بحثهایی وجود داشته است. اما تقریباً در همه جا سیم هوایی ترجیح داده شد. ریل گذاشته شده در کانال به طور کامل ویژه محلات اعیان‌نشین شد که از خراب شدن مناظر طبیعی بوسیله سیمها و دکل‌های نگهدارنده آنها ناراحت می‌شدند. تنها واقعیت حقیقتاً ارزشمند همانا آغاز تغذیه تراموای با جریان متناوب، و در سال ۱۸۹۵ با جریان چند فاز بود.

از سوی دیگر، پس از مدت کوتاهی، کاربرد تراموای، دیگر سودآور نبود و شرکتها بی‌درنگ اعانه ملی اعلام کردند. در آستانه جنگ جهانی اول، اتوبوسها به رقابت با ترامواها به خیابان آمدند. اما بازتابهای این محصولات نخست خودنمایی می‌کردند.

مرحله تراموای در آغاز کشش با برق، تنها یک حادثه منفرد نبود، بلکه شروع برقی کردن راه آهن سنتی بود، که با رواج دیزل، محو کلی لوکوموتیوهای بخاری را طی شصت سال سبب شد. راه آهن مادر شهرها در ابتدا طرح ایجاد خطوطی در نظر بود که از ترافیک شهری، یا از بالا بوسیله پلهای روگذر، یا زیرزمین، مستقل بودند. در شهرهایی که چنین خطهایی برقرار شده بود - مانند لندن، نیویورک و شیکاگو - لوکوموتیوهای بخاری جای خود را به کشش با برق سپردند. در شهرهای دیگر نظیر پاریس و برلین، طرحهای راه آهن مادر شهری در مواردی پس از دهها سال گفت‌وگو راه حل منطقی خود را یافتند.

در شهر پاریس قوانین سالهای ۱۸۹۷ و ۱۸۹۸ درباره ایجاد شبکه راه آهن ما در شهری به جنگی طولانی انجامید که حدود سی سال این شهر با دولت، یعنی شرکتهای راه آهن مخالفت می‌کرد. هدف شهردارها برقرار کردن یک شبکه حمل و نقل سریع بود تا بتوان همشهریها را در داخل شهر جابه‌جا کرد. قطارهای راه آهنهای سراسری منطقاً برای این کار مناسب نبودند زیرا عرض خطوط و فاصله ریلها از یکدیگر نسبت به خطوط بین‌المللی کوچکتر بودند. شرکتها بویژه میل داشتند که بوسیله تونلها یا ریلها روگذر، خطوط آهن را به یکدیگر متصل کنند، تا ایستگاههای بزرگ

از حالت بن‌بست خارج و به یکدیگر مرتبط شوند. پس از چند حادثه، نزدیکی نمایشگاه عمومی ۱۹۰۰ نوعی سازش بین این دو جبهه ایجاد کرد: عرض خط، معمولی و فاصله ریلها از یکدیگر کم شد و با وام از شهرداری و سرمایه خصوصی یک شرکت دارای امتیاز نیز سرمایه لازم تأمین شد. کارهای اولیه در پایان سال ۱۸۹۸ با مدیریت آقای فولزانس بین‌و<sup>۱</sup> شروع شد؛ وی در واقع شبکه متروی پاریس را، که مدت چهل سال، تقریباً بدون تعمیرکار کرد، ساخت. طبیعی است که وسایلی از نوع جدید را در حساب نمی‌آوریم: نخستین خط در ۱۹ ژوئیه ۱۹۰۰ گشایش یافت. ده سال بعد، طرح اولیه کاملاً پایان یافته بود؛ اما گسترش شبکه به‌طور منظم، نخست داخل شهر، سپس با توسعه‌های Extra-muros (برون شهری) از سال ۱۹۳۴ ادامه داشت. از همین دوران رفته‌رفته پذیرفته شد که طرح اولیه مترو مانع گسترش جغرافیایی پاریس از محدوده کوچک خود است. گسترش شهرکهای حومه در سالهای ۵۰ که در پرتو وجود اتومبیل و تکنیک حمل‌ونقل مشترک با کشش با برق انجام گرفت می‌بایست تکنیکهای شهرسازی را دوباره به جریان انداخته باشد؛ یا اینکه به عبارت دقیقتر، در داخل این مجموعه ناآرام تکنیکها کامل شده باشد. می‌توان ادعا کرد که در آن زمان، رقابت گروههای مالی در اواخر سده پیش سبب شد که اتصال خطوط آهن شبکه‌های بزرگ با شبکه‌های درون شهری، به‌طور کامل کنارگذاشته شود. در واقع می‌بایست به‌بهای سرمایه‌گذاریهای بسیار گزاف، یک شبکه دیگر شهری به راه و ریلهای معمولی بیفزایند - کاری که اگر نحوه تفکر بهتری بر تصمیمات نخستین، حکومت داشت بدون شک از آن پرهیز می‌کردند.

پدیده مترو در جهان بسیار زودتر از تصمیمات گرفته شده در پاریس، لندن ۱۸۶۳ نیویورک ۱۸۶۸، شیکاگو ۱۸۹۲ و بوداپست ۱۸۹۶، گلاسکو ۱۸۹۷ خود را نشان داده بود. کهنترین آنها، با کشش با برق و شبکه‌های توسعه یافته نوسازی شدند. پیش از جنگ جهانی اول، بسیاری از شهرهای بزرگ در سایه مزایای برق، این جنبش را دنبال کردند: بستن (۱۹۱۰)، برلین (۱۹۰۲)، فیلادلفی (۱۹۰۷) و هامبورگ (۱۹۱۲)، همان‌طور که می‌دانند این تکنیک جابه‌جا کردن گروهی هنوز به پیش می‌رود.

نخستین خدمات بین شهری: سرانجام یک پدیده بینابین تراموای و کاربرد کشش برقی در شبکه‌های بزرگ، در سالهای ۱۸۹۰ با تأسیس خطوط بسیار طویل و واگنهای سرباز ویژه تأسیس شد. این خطوط برای خدمت در حومه شهرهای بزرگ و حتی خدمات بین شهری و یا اینکه جهت حمل‌ونقل در بعضی از دره‌های کوهستانی ایجاد شدند.

برای پاسخ دادن به مقتضیات گوناگون، بویژه وزن واگنها و سرعت مناسب قطارهای باری،

موتورهای جدیدی بررسی شدند. استقرار موتورهای روی بوجیهای کشنده، انتقال حرکت از محور موتور به آکسل نیز باید حل می‌شد. بر آن شدند که به همه قطعات، از جمله موتور، استحکام زیاد بدهند. قطعات را با یکوری کردن حمایت می‌کردند و بدین ترتیب از آنها نه تنها در برابر آب و گل، بلکه در برابر پرتاب اجسام جامد هم حمایت می‌شد. کثرت راه‌حلهای پیشنهادی طی این چند سال پایانی سده نوزدهم، قدرت الکترومکانیک آن زمان را آشکار می‌سازد.

کشش برقی در شبکه‌های بزرگ: بدین ترتیب، نخستین لوکوموتیوهای برقی، که پس از مدت کوتاهی بنوعی تازه‌ای از کشش روی شبکه‌های با ترافیک زیاد تبدیل شدند، ساخته شد. این کار نخست از طریق میان بر زدن لوکوموتیوهای مانوری شروع شد و شرکتها رفته‌رفته با کشش برقی مأنوس شدند: مانور در ایستگاه جور کردن قطارها، یا کشش واگنهای مسافری یا باری در مسافتهای کوتاه راههای زیرزمینی. آقای آندره بلوندل چنین می‌نویسد: «تاریخ لوکوموتیوهای برقی در ابتدای کار را می‌توان نوعی مصیبت‌نامه طویل نامید زیرا در آن جز آزمایشهای بی‌سرانجام چیز دیگری وجود ندارد.» همین نویسنده در سال ۱۸۹۸ لوکوموتیوهای سالهای ۱۸۸۸ تا ۱۸۹۲ را موتورهای تاریخی می‌نامد. بدین ترتیب، آنها تحول سریعی داشته‌اند و تنها تاریخ دوران کوتاهی از آن را می‌توان مصیبت‌نامه دانست.

علاوه بر این، موتورها، استقرار و کوپلاژ آنها، یکی از مشکلات ویژه این نوآوری مربوط به خط الکتریکی و تغذیه آن بود. نمایه تغذیه خطوط توزیع‌کننده جریان در فواصل زیاد، بیشتر یک شکل اقتصادی بود تا فنی. شرکتها، پیش از تعهد به سرمایه‌گذاریهای کلان، مایل بودند بدانند که آیا لوکوموتیوهای برقی می‌توانند نیازهای جابه‌جاسازی مردم را در آینده برآورده سازند. همچنین غالباً در سالهای ۱۸۹۰، این آزمایشها با موتورهای انجام گرفته بودند که از برق باتریهای انبارهای، با تکنیکی که آقای رافار برای انطباق آن انتخاب کرده بود، تغذیه می‌شدند. یکی از بررسیهای بسیار مخصوص، طرز فکر عصری را بخوبی می‌نمایاند که چگونه صاحبان روشن‌سازی با برق، مورد انتخاب را به مشتریان خود عرضه می‌کردند. آنها وی را بین چند مولد جریان برق با ماشین بخاری که در خانه کارگذاری شده است یا با ملزومات جریان برق از بخش توزیع قرار می‌دادند. این همان کاری است که هایلمان در فرانسه برای شرکت راه‌آهن غرب انجام داد و در سالهای ۱۸۹۳ - ۱۸۹۴ نوعی لوکوموتیو را به‌طور آزمایشی به حرکت درآورد که با فروتنی نام *Fusée* (موشک) را روی آن گذاشته بود تا خاطره *Fusée* آقای استیونسن زنده شود.

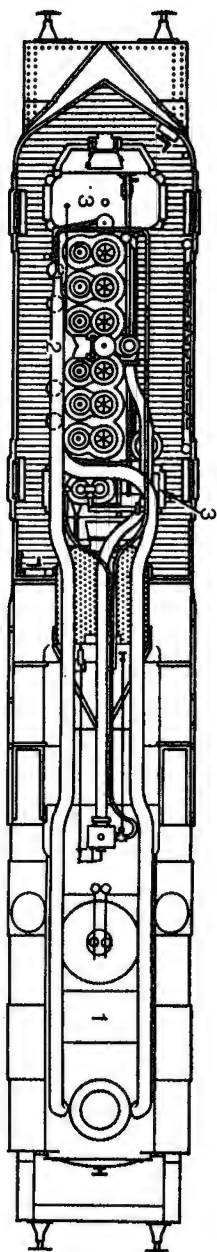
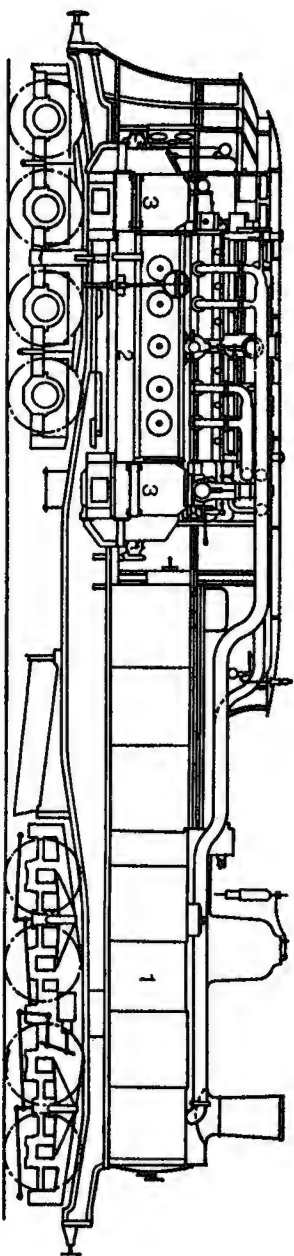
لوکوموتیو هایلمان برق خود را از ماشین بخار و دو دینام می‌گرفت (شکل ۶۹). این ماشین بخار

مدلی با شش استوانه عمودی بود که دارای سه انبساط ماشین ویلنس بود (صفحه ۹۳). تعادل این ماشین موضوع بررسیهای پیشرفته‌ای شد: این دو دینام، شش قطب داشتند که آنها را شرکت براون - باوری ساخته بود و به شکل موازی کوپلاژ شده بودند. آنها چهار موتور با شاتون توخالی را که هریک مستقیماً روی یکی از آکسلهای دو بوجی کشنده، کوپلاژ شده بودند تغذیه می‌کردند. این نوع کوپلاژ تکرار همان روش شرکت‌های امریکایی تامس - هوستن و ادیسن بود که برای عملی کردن آن جهت نخستین لوکوموتیوهای سنگین، ۳۰ تنی، ساخت خود کوشیده بودند. وانگهی، پس از اندک مدتی، که به تناژهای بسیار بالا دست یافتند، دیگر نمی‌بایست از این وسیله استفاده کنند. روش انتقال حرکت از موتور به محورها حرکت‌دهنده (آکسل)، که بسیار رضایتبخش بود، انتقال چرخنده‌ای بود.

درباره کارهای هایلیمان باید گفت که با ساخت دو مدل دیگر قویتر از اولی دنبال شدند. اما چنین می‌نماید که اندیشه این مخترع کسانی زیادی را علاقه‌مند ساخت. با وجود موفقیت بسیار کوتاهی که موشک هایلیمان به دست آورده بود در مدت اندکی به تاریخ سپرده شد. انتقال برقی حرکت از منبع انرژی متصل به آکسلهای لوکوموتیو، تا مدتها بعد تقلید نشد و آن‌هم در زمانی بود که کاربرد موتورهای دیزل در ترنها تازه شروع شده بود، یعنی پایان سالهای ۱۹۳۰، سپس، سی سال بعد، در توربینهای گازی.

در همان دوره، علاوه بر کار منفرد هایلیمان، پس از لوکوموتیوهای برقی کوچک مانوری، نخستین لوکوموتیوهای پر قدرت، ویژه خطوط بزرگ، برای کاربردهای صنعتی یا خطوط فرعی با ترنهای سبک به میدان آمدند.

آغاز سیاست برقی کردن: در سال ۱۸۹۵ شرکت جنرال الکتریک لوکوموتیوی با ۹۰ تن وزن برای راه آهن بالتیمور و اوهایو ساخت، این لوکوموتیو هنوز یک استثناست (شکل ۷۰). شرکت وستینگهاوس با همکاری شرکت بالدوین، که در اصل در اوایل سالهای ۱۸۳۰ لوکوموتیوهای امریکایی بخاری می‌ساخت، در همان اوان چندین لوکوموتیو با انتقال چرخنده‌ای حرکت به بازار آورد؛ تا برای قطارهای باری سریع مورد استفاده قرار گیرند. بین انواع این لوکوموتیوها تفاوت چندانی وجود نداشت، جز اینکه قدرت موتور لوکوموتیوهای چرخنده‌ای بسیار کمتر بود. وزن لوکوموتیوها برای قطارهای باری در صورت نیاز می‌توانست با بارهای جرم تعادل افزایش یابد. بعضی از این مدلها را آقای اسپراگ بررسی کرد و با همکاری دانکن<sup>۱</sup> و هاجینسن<sup>۲</sup> به رقابت آنها برخاست (شکل ۷۱). در اروپا، کشش با برق در شبکه‌های بزرگ، تنها پس از تغییر سده انجام گرفت. موفقیت

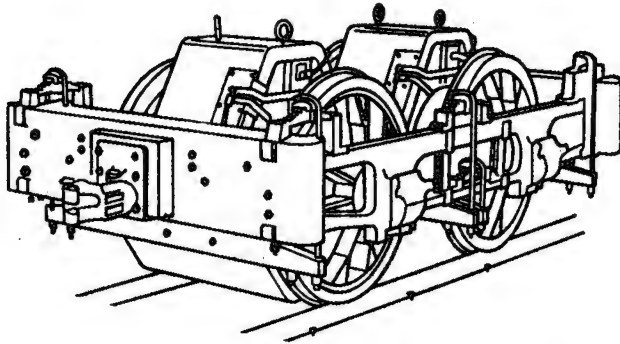


شکل ۶۹. لوکوموتیو هایمان با ماشین بخار و مولد برق.

۱. دیگ بخار مشابه دیگ بخار لوکوموتیوهای بخاری معمولی؛

۲. ماشین بخار تندکار با سیلندرهای عمودی در یک خط، توزیع بخار بوسیله کشوی پیستونی؛ ۳. دو مولد برق که در انتهای دسته موتورهای برقی، روی محورهای بوجیها سوار شده‌اند (شاتونهایی که روی بوجیهی جلو و بوجیهی ترمز نشان داده شده‌اند).

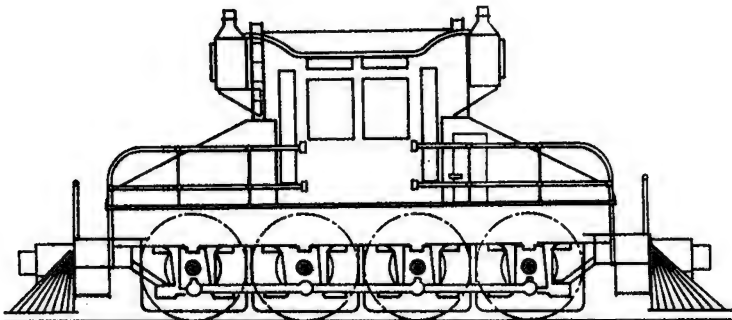




شکل ۷۰. موتور بوجی‌دار لوکوموتیوهای راه‌آهن بالتیمور-اوهایو.

هر آکسل حامل یک موتور برقی است که محور آن در هر سر خود یک قطعه پنج شاخه دارد که در نزدیکی طوقه بین پره‌های چرخها درگیر شده‌اند. انعطاف‌پذیری اتصالات با توییپهای کاتوجویی تأمین شده است. هر لوکوموتیو دو بوجی دارد.

ترامواها با پیدایش نیاز پنهانی در شهرنشینان ارتباط داشت. رفتار تکنسین‌ها در اواخر سده ۱۹ در مورد کشش برقی در شبکه‌های بزرگ راههای دور با حزم بسیار همراه بود. این کار به عقیده آنها حکم یک مسکن را داشت، همراه با مانور در ایستگاه، تونلهای طولی، و شیپهای تند. در فرانسه در سالهای ۱۸۹۵ - ۱۸۹۸ چندین خط ویژه کوهستان تأسیس شد که مشهورترین آنها، باز هم خط



شکل ۷۱. لوکوموتیو برقی اسپراگ، ساخت بالدین و وستینگهاوس. چهار آکسل دارد که هر یک مجهز به یک موتور است.

Fayet-Saint-Gervais در شامونیکس<sup>۱</sup> در ایالت اوت - ساووا بود. این خط بعدها تا مرزهای سویس ادامه یافت و در آنجا با خط شانلار<sup>۲</sup> متصل شد. یک راه آهن برقی صفحه دنده‌ای، حومه شهر ژنو را در سال ۱۸۹۲ به قله کوه سالو<sup>۳</sup> متصل ساخت. در کشورهای دیگر، اتصال فلورانس به فیژوله<sup>۴</sup> در ایتالیا در سال ۱۸۹۱، و لوکوموتیو قله پیمای گورنرگرا<sup>۵</sup> در سویس، لوکوموتیو یونگفراو<sup>۶</sup> که در سال ۱۹۰۲ ساخته شد توان برق را در گذشتن از شیبهایی که غالباً از عهده خودروهای دیگر ساخته نبود، نشان داد. همه اینها کارهایی بودند که سازندگان آنها حق داشتند سرفراز و محبوب مردم باشند.

اما مهندسان الکترومکانیک این نسل، تصور نمی‌کردند که برق بتواند مسیرهای طولانی را بپیماید. آقای آندره بلوندل که در سال ۱۸۹۸ این نظر را داشت که کشش با برق محدود به مسافتهای کوچک است، نظر آقای اسپراگ در سال ۱۸۹۵ را نقل می‌کند که گفته بود: برق نتوانسته است ناقوس مرگ لوکوموتیوهای بخاری را به صدا درآورد، همان‌طور که دینام، ناقوس مرگ ماشین بخار ثابت را به صدا درنیاورد». در ۱۸۹۵ به نظر اسپراگ، ماشین بخار ثابت، هنوز یک ماشین پیستوندار بود. این ناقوس برای مرگ لوکوموتیوهای بخاری به صدا درآمد، اما نیم سده پس از این تاریخ.

اما هنوز از انتشار کتاب بلوندل، بسختی پانزده سال گذشته بود که آزمایشی مخالف پیش‌بینی وی آماده شد. تعمیم کشش با برق، لااقل برای خطوط حومه و بعضی خطوط دور، منجر به ایجاد ترمینالهایی در چند شهر بزرگ شد که به حق در آن زمان به عنوان کارهای چشمگیر شهرت یافتند. یکی از موفقترین آنها، ایستگاه اوسترلیتز در پاریس بود. که راههای آن بمناسبت نمایشگاه سال ۱۹۰۰ تا ایستگاه اورسه ادامه یافتند. بعضی از راه‌های مورد استفاده، در یکی از نخستین ایستگاههای بزرگ زیرزمینی نیویورک، Penn' Station اقتباس شدند.

هنوز چندی نگذشته بود که تجهیز Grand Central Station همان شهر، امکانات ترافیک فشرده حومه و خطوط بزرگ را به یاری برق بخوبی ثابت کرد، بویژه امکان فرمان از دور موتورهای کششی تک اطاقی که در یکی از دو سر قطار جاسازی می‌شدند کار را تا اندازه‌ای ساده کرد؛ و با حذف مانور لوکوموتیو، سرعت تازه‌ای به‌کار داد. چنین مزایایی که برای متروی پاریس، در ابتدای کار پیش‌بینی نشده بود، در اینجا سرعت به‌کار گرفته شدند.

توزیع نیروی محرکه روی چند آکسل، که موفقیت راه آهن کوهستانی را تضمین کرد، بوسیله عواملی که کشش را تقویت می‌کردند - کاری که به سود قطارهای باری نیز بود - راه‌اندازی و

شتابگیری سریع ترن را نیز ممکن ساخت. مکانیسم شتابگیری نیز آسانتر شد و بعدها سرعتهای تجارتی قطارهای با مقصد دور با اعطاف بیشتری افزایش می‌یافتند. ضمناً باید در نظر گرفت که خود این موتور برقی در آن زمان بسرعت‌های بسیار بیشتر از موتور بخاری دست یافته بود.

تجهیزات برقی راه‌آنها در آغاز تکیه زیادی به ریل‌های مجزای حامل جریان، مستقر در کنار راه داشتند. این وسیله بدون اینکه انحصاری باشد طی چند سال چنان رواجی یافت که استفاده از کشش برقی برای مسافتهای زیاد به کابلهای برقداری محول شد که دکلهای یا بل‌ها با دخالت پانتوگراف آنها را حمل می‌کردند؛ و این روشی بود که با هزینه بسیار کم، خط تغذیه را برقرار کرده بود.

تحولات بزرگ تکنیک: برقی کردن شبکه‌های بزرگ اروپا نیز مانند ممالک متحده امریکا در برهه سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۱۰ آغاز به شکفتن کرد. در فرانسه، خطوط برقی شده پیش از جنگ جهانی اول: خط پاریس - ژوویزی<sup>۱</sup> با جریان مستقیم ۶۰۰ ولتی، سپس پاریس - ویرزون<sup>۲</sup> با جریان مستقیم ۱۵۰۰ ولتی روی شبکه پاریس - اورلئان بود. شرکت میدی نیز برقی کردن خط مرکز نوسارگ<sup>۳</sup> در بزیه<sup>۴</sup> را انجام داد. باز همین شرکت است که کار برقی کردن شبکه خود را در دوره بین دو جنگ فعالانه به پیش برد. شبکه l'État<sup>۱</sup> برقی کردن خطهای خود در حومه پاریس را در سالهای ۱۹۱۰ انجام داد.

گرایش به افزایش ولتاژ تغذیه در این دوران مشهور است. از ولتاژ توزیعی در شهر با جریان مستقیم ۵۰۰ یا ۶۰۰ ولت به ولتاژهای ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ و سپس به ۲۴۰۰ روی آوردند. تغذیه تکفازی با ولتاژ بالا (۶۰۰۰ ولت در لیون)، با کاهش بسامد به ۱۵ یا ۲/۳ و ۱۶ دور (۱/۳ بسامد ۵۰) همراه بود، درحالی‌که در ممالک متحده امریکا از بسامد ۲۵ دور استفاده می‌شد.

از تجهیزات بسیار جالب اروپا می‌توان از تجهیزات ایتالیا در سالهای ۱۹۰۲ و ۱۹۰۴ برای کارهای بندر جنوا و نیز اتصال مودان<sup>۵</sup> به تورینو نام برد. مهندسان ایتالیایی که در آن زمان پیشاهنگان بسیار نوآوری در کار کشش با برق بودند از جریان سه فاز و موتورهای ناهمزمان (آسنکرون) استفاده می‌کردند. شرکت براون - باوری، به‌طوری‌که دیدیم، در سال ۱۸۹۶ نمونه‌ای از این طرزکار را در مورد یک خط تراموای در لوگانو<sup>۶</sup> با جریانهای ۴۰۰ ولت و بسامد ۴۰ دور عمل کرده بود. تجهیز خطوط ایتالیا با جریانهای سه فاز و ولتاژ ۳۷۰۰ و بسامد کاهش یافته ۱۶ دور انجام گرفت. لوکوموتیوهای با پنج محور حرکت‌دهنده زوجی چسبندگی محکمی روی ریلها داشتند و وزن آنها برای هر اسب قدرت، بسیار کمتر از دیگر لوکوموتیوهای آن عصر بود (۳۰ کیلوگرم در برابر ۸۰ کیلوگرم لوکوموتیوهای

امریکایی).

در چنین موقعیتی بود که در ایتالیا در پرتو نیرویی که برای روبه‌راه کردن صنعت دارای کیفیت عالی و ساختن نیروگاههای برق آماده شده بود، حماسه‌های بزرگی از صنعتی شدن به‌وقوع پیوست. جریان سه‌فاز، بعداً جهت کشش با برق کاربرد زیادی نیافت. ویژگیهای راه‌اندازی و نحوه کار موتورهای ناهمزمان و نیز پیچیدگیهای مربوط به گرفتن جریان بوسیله لوکوموتیوها، دو کابل هوایی و یک ریل، مانع از رواج آن شد.

برقی کردن مستقیم با جریان صنعتی: برنامه‌های برقی کردن شبکه‌های بزرگ در این دوره بین دو جنگ، در اروپا به پیش برده شد. در فرانسه، در ۱۹۲۰ برای یکی کردن ولتاژ جریان مستقیم به ۱۵۰۰ ولت تصمیم گرفته شد. همین سیاست است که منظمآ ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۹۵۲ شرکت ملی راه‌آهن (SNCF)، به تجهیز خطوط تغذیه مستقیماً با جریان صنعتی تکفاز با ولتاژ ۲۵۰۰۰ و بسامد ۵۰ دور اقدام کرد. نوآوری اخیر بزرگترین موفقیت مهندسان SNCF و چندین مؤسسه بزرگ فرانسه و سویس بود که برپایه یک طرح و انجام دادن یک کار همکاری می‌کردند. برای به‌کارگرفتن لوکوموتیوهای جدید جریان تکفاز با ولتاژ ۲۵۰۰۰ ولت، راه‌حلهای گوناگونی بررسی شدند. تغییر شکل این جریان و کاهش ولتاژ، به کمک تجهیزات خاصی، که تغییرات زیر را ممکن ساختند، انجام گرفت: تبدیل جریان صنعتی به جریان مستقیم یا جریان سه‌فاز، پایین آوردن ولتاژ جریان تکفاز به ۳۶۰ ولت، یا بالاخره تبدیل به جریان تحمیل (مدول) شد. برای موتور کششی با جریان مستقیم.

دو روش نخست تبدیل برای دو ردیف لوکوموتیوهای CC ویژه کشش ترنهای باری سنگین روی یک خط آهن که در منطقه‌ای با صنعت متراکم فعال بودند به‌کار گرفته شدند. این تبدیل بوسیله گروههای کارشناس در هر دو مورد انجام گرفت.

برای تبدیل جریان تکفاز ۲۵ کیلوولتی به جریان مستقیم، این تجهیزات شامل یک ترانسفورماتور تغذیه‌کننده یک موتور همزمان بود که دو دینام جریان مستقیم را فعال می‌ساخت. اینها مولدهای برق موتورهای کشنده بودند. برای تغییر شکل آن به سه‌فاز، ترانسفورماتور پایین‌آورنده ولتاژ، یک تبدیلگر فازها را تغذیه می‌کرد و بدین ترتیب، جریان سه‌فازی با همان بسامد ایجاد می‌شد. سپس یک تبدیلگر فرکانس عمل می‌کرد. سرعت موتورهای کششی، با تغییر بسامد سه‌فازی که موتورها را تغذیه می‌کرد کم‌و زیاد می‌شد.

دو روش دیگر تبدیل بر روی دو ردیف لوکوموتیو BB عملی شده است. این لوکوموتیوها برای

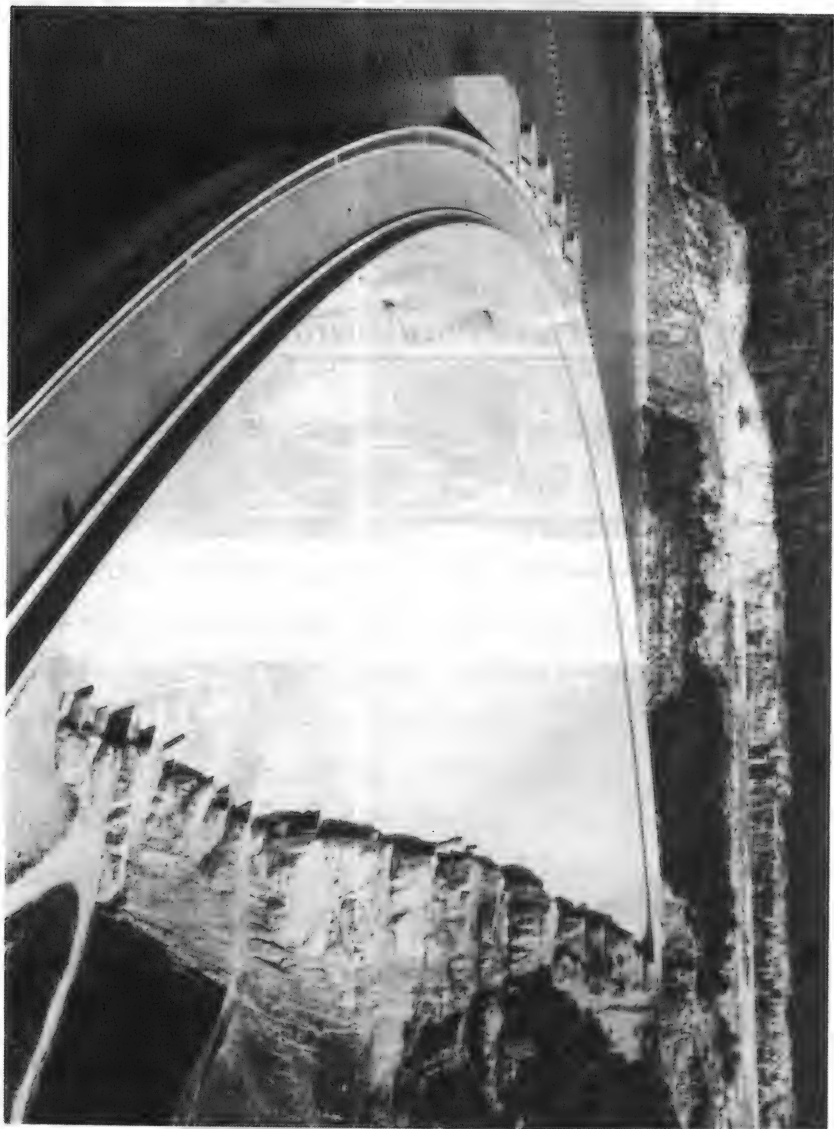
ترنهای مسافری و سریع‌السیر ساخته شده بودند. یکی از آنها موتورهای تکفاز داشت که با توجه مخصوصی برای تأمین کارهای محوله بررسی شده بود و جریانی با فرکانس ۵۰ هرتز بوسیلهٔ یک ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ، آن را تغذیه می‌کرد. در مورد ردیف مجهز به موتورهای با جریان مستقیم، از یک ترانسفورماتور و نوعی یکسوی‌کنندهٔ جریان، با بخار جیوه، که مخصوصاً برای این کار ساخته شده بود و بعدها با نام ایگنیترون شهرتی به هم رساند استفاده شده است.

پس از بررسیهایی که در اوایل سالهای ۵۰ روی خطی که از آنسی<sup>۱</sup> (اوت - ساووا) می‌گذشت انجام گرفت در سال ۱۹۵۲ تصمیم گرفته شد که خط نور<sup>۲</sup> که حوضه‌های زغال‌سنگ والنسیین را به منطقهٔ فلزگری - تیونویل<sup>۳</sup> متصل می‌سازد با جریان صنعتی برقی شود و این کار در سال ۱۹۵۵ به پایان رسید. پس از این تاریخ همین نوع برقی کردن در مناطق شمال و مشرق فرانسه، که برقی کردن با جریان مستقیم ۱۵۰۰ ولتی به‌کار گرفته نشده بود گسترش یافت.

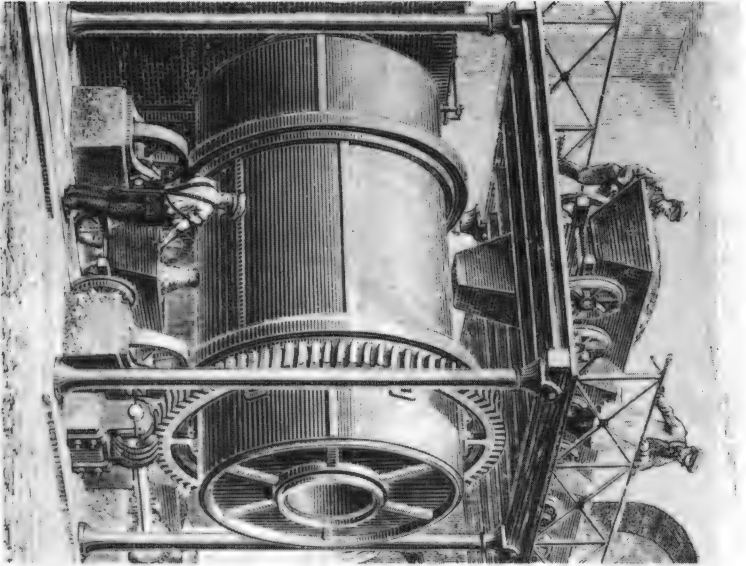
راه‌آهن فرانسه و شبکه‌های بین‌المللی: شرکت ملی راه‌آهن فرانسه نوع دیگری تغذیه لوکوموتیوهای برقی را ایجاد کرد که انعطاف‌پذیری آن می‌توانست به شرایط گوناگون کاری پاسخ دهد؛ علاوه بر آن، روابط گوناگونی نیز میان توزیع جریان برای کشش برقی و شبکه‌های انتقال جریان صنعتی برقرار شد.

از این نقطه نظر، از حدود سی سال پیش، نوعی تحول بی‌برگشت نسبت به اوضاع و احوال اوایل این سده آغاز شده بود. مشکل تولید انرژی برقی برای راه‌آهن، نخست به شکل بسیار ابتدایی حل شد. هر خط برقی شده، شبکهٔ توزیع خود را داشت و این شبکه از کارخانه‌های خاص خود که به شرکت مالک خط تعلق داشتند تغذیه می‌شد. از آنجا که مسافتها نسبتاً کوتاه بودند تجهیزات شبکه‌های محلی برق بار زیادی نداشتند و تولید به سهولت با مقدار مصرف متناسب می‌شد.

در فرانسه، Compagnie d'Orléans نخستین شرکتی بود که بر آن شد تا شبکهٔ انتقال برق خود را با شبکه‌های صنعتی موجود مرتبط سازد و این در زمانی بود که آن شرکت برقی کردن خط آهن پاریس - ویرزون را به پایان برده بود. این گرایش اولیه پس از جنگ جهانی اول، که گسترش سریع تولید و انتقال انرژی برق، برای فراورده‌های جنگی، الکتروموتالورزی و الکتروشیمی به فرانسه تحمیل شد، عمومیت یافت. تغذیهٔ راه‌آهنهای برقی با انشعاب شبکه‌های صنعتی در شماری از نواحی که در آنها انشعابات بسیار متراکم بودند عملی می‌شد. اما در نواحی دیگری در مرکز و جنوب فرانسه، ارتباطات این‌چنین نبود. نخست شرکت اورلئان و سپس شرکت میدی در نواحی کوهستانی که مراکز هیدرولیک تأسیس می‌کردند و ناگزیر به سرمایه‌گذاری هنگفتی شده بودند،



تابوی ۱۹. سد ووگلان در ژورا، فرانسه (۱۹۷۰).



تابوی ۲۰ کوره‌گردان صنایع شیمیایی (۱۸۸۰)؛ برای ساخت کربنات سدیم.

نمونه پیریت.



تابوی ۲۰ مکرر کوره‌گردان صنایع شیمیایی (۱۹۶۵)؛ برای

ظرفیت تولید بسیار بیشتر از نیازهای راه آهن بود. سازمانهای مختلف تولیدی و نیز توزیعی برای تعمیم روابط درونی بین خود، اتحادیه‌ای تشکیل دادند. بدین ترتیب، استهلاك تجهيزات می‌توانست به طرز رضایتبخشی تأمین شود.

نقشی که شرکت میدی در سالهای ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ ایفا کرد در برقی کردن کل نواحی تحت پوشش، اهمیت باز هم بیشتری داشت. در زمان جنگ جهانی اول این شرکت، کارخانه‌های هیدروالکتریکی خود را برای تبدیل تولید آن از جریان تکفاز ۲/۳ و ۱۶ هرتزی به جریان سه فاز ۵۰ هرتزی تغییر شکل داد. زمانی که این شرکت برنامه برقی کردن خود را به خطوط بودرو، تولوز، ست<sup>۱</sup> توسعه داد در پیرنه خود را در برابر تعدادی از شرکتهای تولید برق یافت که شبکه‌های توزیع آنها هنوز توسعه چندان نیافته بودند. این شرکت حتی ساخت مجموعه‌ای از یک دو جین مراکز هیدروالکتریک را عهده‌دار شد و همه تولیدکنندگان موجود را در یک اتحادیه محلی گرد آورد. یک شبکه ارتباطی از همه کارخانه‌های این اتحادیه، گسترش انتقال جریان صنعتی را ممکن ساخت و پستهای فرعی این شرکت خط آهن را تغذیه کرد.

این خط‌مشی کلی که حدود سال ۱۹۲۰ در فرانسه اتخاذ شد، در آغاز از سوی کشورهای دیگر اروپایی پذیرفته نشد. مثلاً کشورهای آلمان و سوئیس شبکه دوگانه‌ای برای انتقال انرژی برق تأسیس کردند که یکی برای جریان صنعتی و دیگری جهت راه آهن بود. بدین ترتیب، این مسأله بسیار مورد گفت‌وگو بوده است و دلایلی به سود بعضی شبکه‌ها بر این حقیقت استوار بودند که مصرف انرژی برای کشش با برق، تنها درصد نسبتاً کوچکی، (حدود ۷ تا ۱۰٪) از مصرف کل را تشکیل می‌دهد. این دلیل می‌تواند نشانه عکس این ادعا نیز باشد. کشورهای دیگری مانند سوئد و نروژ که از نظر انرژی هیدرولیک غنی هستند، حدود سال ۱۹۳۰ به سیستم فرانسه روی آوردند و ایتالیا و مجارستان نیز بزودی دنبال آنها را گرفتند.

راه آهن برقی در ممالک متحده: در ممالک متحده آمریکا، جنبش برقی کردن شبکه‌های بزرگ راه آهن، بسیار دیر شروع شد. کاربرد کشش با برق، تنها در موقعیتهای محلی بود: گذر از تونلهای طولانی و نفوذ در نیروگاههای مرکزی شهرهای بزرگ. تنها در سال ۱۹۳۲ بود که شرکت راه آهن پنسیلوانیا، برقی کردن خط نیویورک-واشینگتن را که به خود آن شرکت تعلق داشت شروع کرد. جریان برق کششی که تا آن زمان به‌کار گرفته می‌شد، جریان مستقیم و با فشار ۶۴۰ ولت، یا تکفاز، با فشار ۱۱۰۰۰ ولت بود. جریان تکفاز با فرکانس ۲۵ هرتز از شبکه انتقالی صنعتی سه فاز را انطباق دادند.



دامنهٔ برقی کردن راه‌آهن امریکا هرگز قابل مقایسه با راه‌آهن اروپا نبوده است. در سال ۱۹۳۰ طول خطوط راه‌آهن در ممالک متحده ۳۰۰۰ کیلومتر بود و درحالی‌که در اروپا به ۷۵۰۰ کیلومتر می‌رسید. شرکتهای امریکایی که به تعداد زیادی از لوکوموتیوهای بخاری مجهز بودند که جنگ هیچ‌گونه زیانی به آنها وارد نساخته بود، در سالهای ۴۰ باز هم به کار سنتی و رکوردشکن ساخت این نوع لوکوموتیوها ادامه دادند و لوکوموتیوهای غول‌آسا و درخور عصری را می‌ساختند که به یکباره به پایان رسید. طی سالهای ۱۹۳۰ لوکوموتیوهای بزرگ دیزلی، کشش ترنهای مسافری در خطوط طویل را شروع کردند و روش دیزلی کردن پس از پایان جنگ جهانی دوم با سرعت دنبال شد. در این زمان طرحهای بزرگ برقی کردن رها شده بود. پانزده سال بعد، صنایع هواپیمایی و اتومبیل‌سازی، صنعت راه‌آهن - یعنی، همان صنعتی - که در سدهٔ پیش از آن، پرچم پیروزی غرب بود - را به رکود کشانیدند.

## گسترش بزرگ سده بیستم

مدتی کمتر از ۲۵ سال، رشته الکتروتکنیک متکی به تکنیکهای سست ماشینها گردان اولیه بود. این فرصتی بسیار کوتاه برای تشکیل یک تکنیک جدید پیشتاز بود. این سرعت نوآوری بیایی، تنها برای چند نمونه بسیار محدود وجود داشته است: توربینهای بخار، که در این زمینه هم وسایل تولید بخار بسیار پیشرفته بودند و هم موتورهای جدید برای راه انداختن مولدهای برق به موقع رسیدند. نیرساناها هم در بخشهایی از تکنیک به کار گرفته شدند که گویا آنها را انتظار می کشیدند. از میان همه عواملی که این شگفتگی را ممکن ساختند، عاملی که تا کنون از آن کمتر یاد شده است، تکنیک رسانیدن برق از محل تولید به محل مصرف بود. در واقع این کار زمانی پیش کشیده شد که نخستین ماشینهای الکترومغناطیسی هولمز و مالدرن<sup>۱</sup> به کار افتادند. این تحول با پیشرفت تکنیک مولدها، که با آن، همراه و حتی آن را مشروط هم می کند از پا نایستاد.

---

1. Malderen

## توزیع جریان برق

دیده شد که در چه اوضاع و احوالی نمایشهایی داده شد که ثابت می‌کرد که جریان مستقیم و نیز جریان متناوب را می‌توان به بهترین وضعی بمنظور انتقال انرژی به مسافتهای دور مورد استفاده قرار دارد. این نمایشها، که در اواخر سالهای ۱۸۸۰ هم هنوز در تصور نمی‌گنجیدند از عواملی بودند که همه دورنمای کاربرد برق را تغییر شکل دادند.

در همان آغاز این دوره، جریان یک پیل یا ژنراتور الکترومغناطیسی را به گیرنده‌ای که تقریباً تنها از یک لامپ قوسی یا یک ظرف الکترولیز تشکیل می‌شد منتقل می‌کردند. این مدار بسیار کوتاه چند متری، تنها دو سیم بود که سرهای گیرنده را به الکترودها وصل می‌کرد. تغذیه دستگاه که با یک مولد چند سرانجام می‌گرفت دشواریهای بسیار پیچیده‌ای ایجاد کرده بود که برای برطرف ساختن آنها باید چاره‌اندیشی می‌شد.

نخستین راهی که برای حل مشکل اندیشیده شد، در سال ۱۸۶۷، استفاده از یک موتور حرارتی، بخار و سپس گاز، برای گرداندن چندین ماشین، مثلاً از نوع آلیانس بود که القاگیرهای آنها بر یک محور سوار شده بودند؛ و هر مولد، یک لامپ را تغذیه می‌کرد. زمانی که از دینامهایی استفاده شد، القاگیرهای مربوطه را به‌طور زنجیری وصل کردند و تنها یک راه‌انداز که القاگیر آن را یک تسمه کمکی می‌گردانید، دینامها را تغذیه می‌کرد؛ بعد این راه‌انداز را ساده، و روی همان محور مشترک سوار کردند.

نخستین سیستمهای توزیع: پس از مدت کمی، در سال ۱۸۷۲، نخستین طرحهای «توزیع» ارائه شد. لامپهای قوسی به‌شکل چندتایی «همفشار» متصل شده بودند، که بعدها زنجیری اصطلاح شد و سیستمهای به‌کار رفته، متناسب با شکل جریان مورد مصرف، مستقیم یا متناوب بود، و شمار لامپهایی که تغذیه می‌شدند تغییر می‌کرد.

ماشین گرام، که پنج شعله نامیده می‌شد می‌توانست پنج لامپ قوسی با اتصال زنجیری را روشن کند. نیروی برق‌رانی آن ۲۵۰ ولت بود زیرا برای هر قوس می‌بایست ۴۰ تا ۵۰ ولت موجود باشد. وسیله خودکاری که آن را کوته‌مدار می‌کرد و چند نمونه از آن دیده شده است، مانع از آن بود که خرابی یک لامپ سبب خاموشی همه آنها شود.

ماشینهای آقای براش و شرکت تامسن - هوستن که از امریکا بسرعت اروپا را تسخیر کرد برای برق‌رسانی تا ۶۰ لامپ با اتصال زنجیری طرح‌ریزی شده بودند. نیروی برق‌رانی آنها بسیار بالاتر، ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ ولت بود. این ماشینها بدون کلکتور گرام بودند اما سیستم پیچیده‌تری داشتند

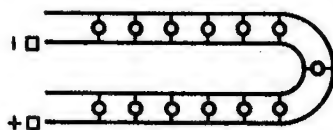
که امکان می‌داد در فشارهای بالای این دوره، بخوبی کار کنند. کمی بعد، توانستند که ماشینهای کلکتوردار با فشار بالا، نظیر ماشین وود بسازند که با ۲۶۴۰ ولت کار می‌کرد.

گسترده‌گی این مدارها، توزیع واقعی را تأمین می‌کرد. در لندن توزیع برق در طول ۶ کیلومتر با دو مولد دارای اتصال زنجیری، هر یک با ۸۳۹ و در لحظه شروع ۱۵۴۸ ولت انجام می‌گرفت که ۳۴ مرکز با آن تغذیه می‌شد.

روشن‌سازی اپرای پاریس بمناسبت نمایشگاه سال ۱۸۸۱ بوسیله ۳۸ مرکز تأمین شد که از تعدادی مولد برآش مستقر در شان‌الیزه با خطی به طول ۱۲ کیلومتر تغذیه می‌شدند. ماشینهای تقسیم گرام و لونت که جریان متناوب برای شمعهای یابلوچکوف تأمین می‌کردند نخستین دستگاههایی بودند که برای شروع کار مولد، توزیع را تأمین می‌کردند. روی هر یک از آنها قرقره‌های مستقر روی یک حلقه بیرونی، هر کدام یک گروه پنج لامپی را تغذیه می‌کردند. مدل رایج ماشین گرام دارای هشت بخش چهار قسمتی بود که می‌توانستند به‌طور ولتاژی یا مقداری یعنی با اتصال زنجیری یا موازی به هم مربوط گردند. این دستگاه مانند مولد برآش، ۶۰ لامپ را تغذیه می‌کرد اما خطی دو سیمی برای هر گروه پنج لامپی لازم بود که جمعاً دوازده خط می‌شد. بدین ترتیب، روشن می‌شود که گرام نخستین کسی است که سیستم چند فاز را تولید کرده است - ابتکاری که به حساب نیامده است. توزیع با شدت ثابت: در هر جا که از تأسیسات برآش اقتباس شده است، دغدغه ثابت نگاهداشتن شدت جریانی که از یک مدار می‌گذرد وجود دارد. زمانی که یک لامپ کوتاه‌مدار می‌شود، باید ولتاژ را در آغاز خط به ۵۰ ولت پایین آورد، سپس هر زمان که لامپ به مدار بازگشت ولتاژ را بالا برد. نخستین تنظیمها با دست بود. بدین ترتیب که سرعت گردش ماشین بخار را تغییر می‌دادند.

زمانی که توانها روی به افزایش نهادند دستگاههای خودکاری طحریزی شد، که دستگاه کابانلا را می‌توان نمونه‌ای از آنها دانست. این دستگاه - لاقل از نظر تئوری - یک شبکه واقعی بود، زیرا چندین مولد که با اتصال زنجیری به یکدیگر کوپلاژ شده و ولتاژی برابر حداکثر ولتاژ لازم تولید می‌کردند به این دستگاه برق می‌رسانیدند. هر ماشین را می‌شد برحسب ضرورت وارد مدار کرد یا از آن خارج ساخت.

اما پس از اندک زمانی، از سال ۱۸۸۱، این دستگاه رفته‌رفته از دور خارج شد؛ با این حال، در موارد ویژه‌ای، مثلاً در سیستم رنه‌توری، که از آن سخن گفته‌ایم، در آغاز سده بیستم، برای انتقال جریان مستقیم، تا اندازه‌ای ارزش خود را نگاهداشته بود.



شکل ۷۲. حلقه دپره؛ برای توزیع برق با ولتاژ ثابت.

توزیع با ولتاژ ثابت: پیدایش لامپهای فروزان نخستین سوان و ادیسن، انگیزه‌ای برای بررسی سیستمی از توزیع با ولتاژ ثابت شد. همه دستگاههای گیرنده با اتصال موازی سوار می‌شدند، اما با شروع کار این سیستم، واقعاً می‌توان از کار توزیع، به معنای کنونی آن سخن گفت. دیگر مسأله وارد کردن سیمهای دارای فشار قوی به درون خانه‌ها - که خطری برای مصرف‌کننده بود - وجود نداشت وانگهی افروزه‌ها شکننده بودند و توان پایداری در برابر تغییرات شدید ولتاژ، حول فشار اسمی را، که در ابتدا ۶۰، سپس بسیار سریع به ۱۱۰ ولت می‌رسید نداشتند. بنابراین، می‌بایست وسایلی برای «تنظیم ولتاژ» به نسبت بار الکتریکی اندیشید. برای این کار از «منحنیهای مشخصه» آقای هاپکینسون استفاده کردند. این منحنیها چگونگی تأثیر متقابل عوامل گوناگون یک مولد: فشار، شدت، سرعت گردش القاگیر، جریان تحریک را بر یکدیگر نشان می‌دهند.

آقای هایرم ماکسیم توانست تنظیم ولتاژ را با یک آهنربای برقی عملی سازد که روی فنر زغال راه‌انداز دینام اصلی، که مجهز به یک تحریک مستقل بود اثر می‌گذاشت.

آقای مارسل دپره، در ابتدا برای راه‌اندازی دینام، ترکیبی از سیم‌پیچها به‌کار برد. سیم‌پیچی که با مدار اصلی خروجی، اتصال زنجیری داشت، مقدار تحریک تولید شده توسط یک سیم‌پیچ مستقل را تصحیح می‌کرد. وی بعداً سیستم بسیار کارآمدی از فیوز برق پیشنهاد کرد که در مقیاس بسیار بزرگی رواج یافت (شکل ۷۲). اگر انشعاب دادن لامپها روی یک خط دو سیمی را می‌پذیرفتند، یا افت ولتاژ در پایان خط بسیار زیاد می‌شد یا اینکه باید سیمهای بسیار ضخیم به‌کار برند. در سیستم دپره هر دو سیمی که از دینام می‌آمد. مدار تغذیه را به‌طور کامل مشخص می‌ساخت و «حلقه‌وار» به‌سوی دینام برمی‌گشت. بدین ترتیب، برای همه لامپهای انشعابی بین این دو سیم، طول کلی مدار خط برابر باقی می‌ماند. بنابراین، کافی است که ولتاژ را در آغاز مولد به‌مقدار درخور تنظیم کرد و افت ولتاژ در همه نقاط کاربرد بدون تغییر می‌ماند.

شبکه ادیسن: ادیسن هم برای نخستین شبکه خود سیستمی بسیار ابتدایی طرح کرده بود. وی کارگری را مراقب ولت‌سنج کرده بود تا رگوستایی را که روی راه‌انداز مولدها بود با دست تنظیم

کند؛ بدین ترتیب ولتاژ دینامها کنترل می‌شد. در این مورد هم روحیه عملگری «جادوگر» منلو پارک مشهود است و در سایه همین روحیه، وی سازنده نخستین شبکه توزیعی شد که شرح آن گذشت. ادیسن فهمیده بود که برای پایین آوردن بهای تمام شده برقی که به مشتریان خود می‌فروشد باید از ژنراتورهای پرقدرت استفاده کند. یک ماشین ۱۵۰ اسبی می‌توانست یا ۱۰۰۰ لامپ ۱۶ شمعی یا ۲۰۰۰ لامپ ۸ شمعی را تغذیه کند.

لامپهای با افروزة کربنی با منشأ گیاهی به علت تغییر مقاومت آن در اثر گرما،  $\Omega$  ۲۵۰ در سرما و  $\Omega$  ۱۴۰ (اومگا) در گرما، مشخصات کاری ظریفی داشتند. این پدیده هنوز توجیه نشده بود و مشکلات تازه‌ای ایجاد می‌کرد زیرا معکوس مشخصات افروزه‌های فلزی بود. در شرایط کاری دائمی، مولدی که ۱۰۰۰ لامپ را با فشار ۱۰۵ ولت تغذیه می‌کرد در گرما ۷۵۰ آمپر می‌داد که حدود ۸۰ کیلووات می‌شد. تنظیم سرعت گروه ژنراتورها و ولتاژ دینام، در صورت تغییر شدید بارها، کار دشواری بود.

ادیسن چندین دینام ۹۳ کیلوواتی ساخت که یک ماشین بخار ۱۲۵ اسبی آنها را می‌گردانید. وزن آنها ۱۷ تن، که ۱۰ تن وزن القاگر و ۲/۵ تن وزن القاگیر بود. ادیسن در این کار خود هیچ نوآوری نداشت و اصولاً از دستگاههای گرم و زمینس الهام گرفته بود. وی خشنود بود که وسایل معمول در ساخت دینامهای دوقطبی، بویژه القاگر و کفشکهای قطبهای آنها را کاملتر کرده است. آقای ادیسن، برای القاگر وسیله‌ای به‌کار گرفت که گرم آن را برای ماشینهای هشت‌گوش خود مورد استفاده قرار داده بود؛ هشت هسته که پنج عدد آنها روی کفشک بالایی و سه هسته دیگر روی کفشک پایینی قرار داشتند، هشت سیم‌پیچ که با چهار اتصال زنجیری به سرهای القاگیر وصل شده بودند. این رثوستا که با دست تنظیم می‌شد از ۳۰ مقاومت ۱۰۰ اومگایی ( $\Omega$ ) تشکیل شده بود. القاگیر آن که در هر دقیقه ۳۵۰ دور می‌گردید تا ۱۰۵ ولت بدهد بر پایه مدل القاگیر طبلیکی زمینس بود اما مارک ادیسن بر خود داشت؛ استوانه‌ای چوبی که با واشرهای نازک آهنی که با کاغذ از یکدیگر عایق شده بودند، احاطه شده بود. تعداد ۱۳۸ میله فلزی با طولهای بیش از یک متر که القاگرهای فعال را تشکیل می‌دادند و روی ۶۰ دیسک مسی پیچ و مهره شده بودند اتصالیهای جنبی را تأمین می‌کردند؛ سرانجام گرم با دو گروه هشت‌تایی جاروبک.

در مورد خطهای توزیع، که وی آنها را فیدر<sup>۱</sup> می‌نامید - نامی که عموماً پذیرفته شد - ادیسن از سیستم کابلکشی زیرزمینی که آقای پروکس<sup>۲</sup>، یکی از هموطنان وی در سال ۱۸۷۸ آن را به ثبت

۱. به معنای تغذیه کننده - م.

رسانیده بود، الهام گرفت؛ کابلها با نخهای پنبه‌ای یا چتایی عایق می‌شدند و از لوله‌هایی آهنی پر از گریس، گذرانیده می‌شدند. ادیسن به‌عنوان کابل، میله‌های مسی به طول ۶ متر را به‌کار برد و سر و ته آنها را به یکدیگر متصل می‌ساخت. مخلوطی که لوله‌ها را پر می‌کرد شامل قیر، صمغ، پارافین و روغن بزرک بود. این مخلوط در حالت گرم با فشار به درون لوله، وارد می‌شد. مقطع سیمها متناسب با تعداد انشعاب در سرتاسر خط کاهش می‌یافت. در هر محل انشعاب جعبهٔ انشعابی از چدن گذاشته می‌شد تا سیم تغذیه که با نخ پنبه‌ای عایق شده بود بتواند خارج شود.

ادیسن دربارهٔ همه قطعات مدار اندیشیده بود، بعضی از این قطعات مثل سرپیچ لامپ و فیوزهای سربی هنوز هم رواج دارند. او هم‌چنین یک کنتور الکترولیزی اختراع کرده بود که با اتصال موازی در مدار گذاشته می‌شد و مقدار برق مصرف‌شده هر مشتری را با افزایش وزن صفحات مسی غوطه‌ور در محلولی از سولفات نشان می‌داد. ادیسن بسرعت این دستگاه را تکمیل کرد تا از زحمت توزین رها شوند. الکترودها با یک شاهین ترازو به‌طور متعادل آویزان بودند و یک سیستم خودکار در جهت عکس جریان، شاهین ترازو را به نوسان می‌آورد؛ این نوسان، سبب می‌شد که چرخندهٔ گیرداری که عقربه‌ای را روی صفحه حرکت می‌داد به‌کار افتد.

رواج روشنایی با برق: موفقیت ادیسن چندان هم سریع نبود و با گذشت سالها، رفته‌رفته پس از گشایش نیروگاه پرل استریت مردم به وی روی آوردند. دو سال بعد، ۱۸۸۴، بیش از ۱۱۰۰۰ لامپ در ۵۰۰ خانه از این نیروگاه برق می‌گرفتند.

حریفان متعددی قد علم کردند. گرچه ادیسن هنوز انحصار ساخت لامپها را در دست داشت. انواع دیگر لامپهای این دوره پس از مدت کوتاهی کنار گذاشته شدند. ولی او نمی‌توانست مانع تأسیس شبکه‌های شرکت‌های دیگران شود. یک کارخانهٔ هیدرو-الکتریک در سال ۱۸۸۲ در آپلتون<sup>۱</sup> واقع در ویسکانسین تأسیس شد و پنج سال پس از آن، در ممالک متحدۀ امریکا بیش از ۷۰۰ شرکت فعال بودند که نیروگاههای آنها با ماشینهای براش، وستون-ماکسیم، تامسن-هوستن تجهیز شده بودند. در همین سال ۵۵۰۰۰۰ لامپ افروزه‌ای و ۱۴۰۰۰۰ لامپ قوسی روشن می‌شدند.

تولید وسایل برقی ویژه روشنایی، بسرعت افزایش یافت. در سال ۱۸۸۷، کارخانهٔ براش ۵۰۰ کارگر داشت. در ۱۸۸۹ کارخانه تامسن-هوستن در بستن هر ماه ۱۸ دینام، ۴۰۰ لامپ قوسی و ۱۰۰۰۰ لامپ فروزان تولید می‌کرد. برای لامپهای قوسی در هر ماه ۴۵۵ کیلومتر میلهٔ زغالی می‌ساختند.

ادیسن پس از آنکه با سوان شریک شد در اروپا شعباتی تأسیس کرد، در ایتالیا و فرانسه، در آن زمان شرکتهای محلی وجود داشتند. در آلمان در سال ۱۸۹۰ برای روشن کردن ۱۷۰۰۰۰ لامپ فروزان، ۴۰۰۰ دینام می‌گردیدند. این وسایل را زمینس و آ.ا.گ. تولید می‌کردند. نخستین کابلهکشی برای برق در برلین و در سال ۱۸۸۶ انجام گرفت. شهرهای لایپزیگ، مونیخ، کولونی دارای شبکه‌های توزیع بودند.

در فرانسه، تنها از سال ۱۸۸۵ نخستین شبکه واقعی توزیع در نواحی کوهستانی برقرار شد. نخستین کارخانه هیدروالکتریک در بلگار-سور-والسرين<sup>۱</sup> در ایالت آن تأسیس شد و پس از اندک مدتی ایالت‌های بوفور-سور-دورون<sup>۲</sup>، سن ژان-دو-مورین<sup>۳</sup> در ایالت ساووا به دنبال آن رفتند. در سال ۱۸۸۶ شهر سنت-اتین با شرکت کنتینانتال ادیسن<sup>۴</sup> برای توزیع جریان برق مستقیم قراردادی بست و کمی پس از آن شهر تور برای توزیع جریان متناوب همراه با ترانسفورماتوری که ولتاژ را از ۸۲۵ به ۵۰ ولت پایین می‌آورد تأسیساتی برپا داشت. شهر پاریس در سال ۱۸۸۹ به مناسبت چهارمین نمایشگاه عمومی دست به کار روشن‌سازی با برق هم برای خانه‌ها و هم جهت خیابانها و مؤسسات ملی شد.

در پاریس هم‌مانند دیگر شهرهای بزرگ تأسیساتی کم‌وبیش پراکنده پدید آمدند. پس از روشن‌سازی خیابان اپرا و میدان تئاتر فرانسه با شمعهای یابلوچکوف در سال ۱۸۷۸، یک کلاه فرنگی در آل<sup>۵</sup> و میدان باستیل در مدتی بیش از یک سال، ۱۸۷۹ - ۱۸۸۰ از همین تأسیسات استفاده کردند. سپس آقای لونتن مأمور روشن‌سازی میدان کاروزل و کاخ لوور بوسیله رگولاتورهای تولیدی خود شد. برای روشنایی پارک مونسو<sup>۶</sup>، در ۱۸۸۲، شمعهای یابلوچکوف به کار گرفته شد و برای بوت-شومون<sup>۷</sup>، در ۱۸۸۴، لامپهای براش. در همه تأسیسات توزیعی که از آن یاد شده است، عملیات محدودی انجام گرفته بود.

می‌توان تصور کرد که این ادعا که دینام تا آن زمان هنوز منابع شیمیایی برق را به‌طور قطعی تسخیر نکرده بود از نظر فنی، چقدر تردیدآمیز است. در سال ۱۸۸۲ مؤسسه باهمیت Comptoir d'Escompte پاریس تصمیم به پذیرفتن روشنایی برقی گرفت اما به‌عنوان منبع تغذیه، پیلای بیکرومات همراه با یک ماشین بخار برای فعال کردن دینام را انتخاب کرد، که آن را بسیار گران می‌دانستند. تأسیسات باتریهای پیلها همه زیر زمین را اشغال کرده بودند. یک سیستم مکانیکی معمولی می‌توانست همه الکترودهای روی را بالا ببرد تا در ساعتهای غیرفعال، فرسایش نداشته

1. Bellegard-sur-Valserine      2. Beaufort-sur-Doron      3. Saint-Jean-de-Mourienne
4. Compagnie Continental Edison      5. Halles      6. Monceau      7. Buttes-Chaumont



باشند. وانگهی توزیع محلول بیکرومات به توسط یک مخزن و یک موتور گازی، که کمپرسوری را برای جریان دادن هوا در همه پیلها، بمنظور جلوگیری از رسوب اکسید کروم فعال می‌کرد، انجام می‌گرفت. گویا پس از مدتی آشکار شد که این توجه برای صرفه جویی مستقیم، بیهوده بوده است. نمایشهای آقای ادیسن در نمایشگاه برق ۱۸۸۱ اطلاعات مربوط به این مسأله را دقیق‌تر کرد. شهرداری پاریس در سال ۱۸۸۳ با لامپهای فروزان روشن شد. پس از اینکه آتش‌سوزی Opéra-Comique در ۱۸۸۷، شرکت میلده و کلرک<sup>۱</sup> امتیاز تجهیز یک نیروگاه ۱۵۰۰ لامپی را برای روشن‌سازی تئاتر و حتی انتقال جریان برق با کابلهای هوایی، که از بالای بامها کشیده می‌شد به‌دست آوردند.

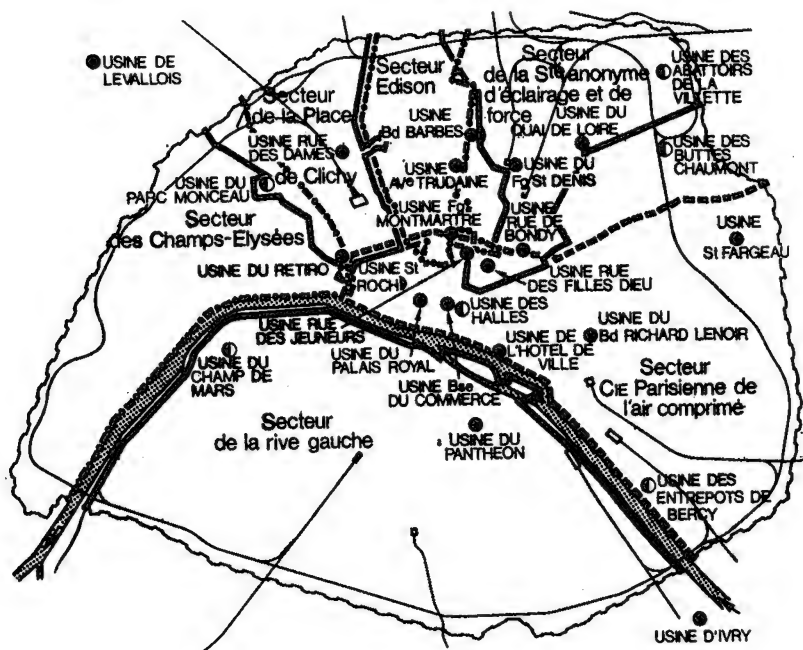
به‌دنبال این آتش‌سوزی بود که شهر، موضوع سازمان دادن روشن‌سازی اماکن عمومی و خصوصی با برق را مورد بررسی قرار داد. کارکنان و مشاوران، چندین پیشنهاد جهت مناقصه را دریافت کردند که براساس سیستمهای گوناگونی استوار شده بودند. چون هیچ دلیل فنی برای ترجیح یکی بر دیگری نبود هیئت رئیسه بر آن شد که جملگی را آزمایش کند و برای این کار، مجتمع را به چند بخش تقسیم کرد و هر بخش را به یک شرکت وا گذاشت.

بخشهای پاریس: ابعاد بخشها و شکل آنها بستگی به تراکم مشتریان داشت. همه کثرت را در رودخانه سن به پنج بخش تقسیم می‌شد. این بخشها به‌شکل ستاره با اضلاع نابرابر بودند و گاهی درهم می‌رفتند. رئوس این اضلاع متوجه محله‌هایی از بولوارهای بزرگ بود که مغازه‌ها و تئاترها در آنها زیاد بودند. ایستگاه راه‌آهن نورد (شمال) برای یکی از این بخشها، محل درآمد خوبی شده بود و کمبود مشتری خصوصی در محله‌های فقیرنشین شمال شرقی پاریس را جبران می‌کرد (شکل ۷۳).

به‌طور کلی، توزیع برق با جریان مستقیم و فشار ۱۱۰ تا ۱۲۵ ولت انجام می‌گرفت. شرکت کنتینانتال ادیسن که بخش آن کوچک ولی جای خوبی بود در خیابان فوبور-مونمارتر<sup>۲</sup> علاوه بر جریان مستقیم ۱۱۰ ولت، جریان متناوب ۲۰۰۰ ولت هم تولید می‌کرد و از آنها برای روشنایی کاخ الیزه<sup>۳</sup>، که محلی برای مجالس رقص و جشنها (مسافت دو کیلومتر) بود استفاده کرد. ترانسفورماتوری در محل، ولتاژ را به ۱۱۰ پایین می‌آورد. شرکت‌های متعددی بوسیله کابلهای تغذیه (فیدر) جریان مستقیم ۳۰۰۰ ولتی که کموتاتوری آن را به ۱۱۰ کاهش می‌داد، برق را توزیع می‌کردند.

توزیع برق با دو، سه یا پنج سیم با سیستمهای گوناگونی از تنظیم فشار بین سیمها به دینامهایی که برحسب مأموریت نقش گیرنده یا دهنده برق را داشتند انجام می‌گرفت. گاهی همین تنظیم را

1. Mildé et Clerc 2. Faubourg-Montmartre 3. Palais de l'Élysée



شکل ۷۳. نقشه بخشهای نخستین توزیع برق در پاریس.

کارخانه‌های برق بخشها با نقاط سیاه نمایانده شده‌اند؛ کارخانه‌های برق شهرداری با دایره‌های سیاه و سفید.

باتریهای انبارهای که بین فیدرها همچون دینام مرتب شده بودند تأمین می‌کردند. وانگهی کاربرد انبارها در همه کارخانه‌های دارای جریان مستقیم تقریباً عمومیت داشت تا برق را در ساعت‌های خالی انبار کنند و در زمانهای بسیار پر مصرف بتوانند از عهده پاسخگویی برآیند.

وسایلی که برای تولید به‌کار گرفته می‌شد بسیار گوناگون بود. حتی در یک شرکت و حتی در یک کارخانه به مقاطعه‌کارهای مختلف مراجعه می‌شد زیرا این تجهیزات می‌بایست طی دو یا سه سال ساخته می‌شدند و یک ماشین‌ساز نمی‌توانست کل اقسام لازم را در فرصتی چنین اندک تهیه کند. در مورد موتورها هم که انواعی از ماشینهای بخار بودند، جز پنج موتوریکی از کارخانه‌ها، در جاهای دیگر، همین وضع برقرار بود. بیشتر کارخانه‌ها در پاریس بودند، و بعضی، در مرکز محله‌های شلوغ قرار داشتند. بیشتر آنها پستهای فرعی یا ترانسفورماتور بودند. تنها دو کارخانه در حومه بودند:

یکی در سنت - اوئن<sup>۱</sup> که جریان مستقیم با ۲۴۰۰ ولت برای شرکت روشنایی و نیرو با سهامی عام تولید می‌کرد و همه کارخانه‌های آن، تنها یک شبکه کامل را تشکیل می‌دادند. کارخانه دیگر در لوالوا - پره<sup>۲</sup> که جریان متناوب با فشار ۳۰۰۰ ولت تهیه می‌کرد که ولتاژ آن در خانه‌های بخش اعیان‌نشین شان - الیزه به ۱۱۰ ولت پایین می‌آمد.

ساحل چپ، تنها یک بخش محروم را تشکیل می‌داد که محله‌های بولوارهای سن میشل و سن ژرمن تقریباً تنها محله‌هایی بودند که شرکت مربوط، به آنها چشم داشت. توزیع برق با جریان متناوب ۳۰۰۰ ولتی از تنها کارخانه ایوری<sup>۳</sup> انجام می‌گرفت.

همچنین باید گفت که سیمهای توزیع برق در پاریس به علت وجود یک کارخانه متعلق به شهرداری که در یک کلاه‌فرنگی واقع در آل بود و محله‌های این ناحیه را با جریان مستقیم و محله‌های اپرا در بون‌نف با جریان متناوب ۲۴۰۰ ولتی روشن می‌کرد، بسیار درهم شده بود. برای روشن‌سازی فروشگاه‌های بزرگ، لوور، بون مارش، پرنتان و تعدادی گراند هتل، همچنین برای روشنایی همه ایستگاه‌های راه‌آهن، جز ایستگاه نورد، شمار زیادی کارخانه‌های خصوصی برق وجود داشت.

نیروی محرکه صنعتی: در همه شهرهای بزرگی که توزیع برق اجرا می‌شد، تفصیلاتی از همین نوع جریان داشت. روشن‌سازی، عامل اصلی تأسیس نخستین شبکه‌های توزیع بوده است. در همان دوران، ترامواهای برقی هم بتدریج راه افتادند؛ اما هر شرکت حمل‌ونقل، از همان آغاز کار، مجهز به یک کارخانه برق و خطوط توزیع مخصوص به خود بود. این وضع چندین دهه استمرار داشت. مدتهای طولانی، برق صنعتی کارگاه‌های تولیدی موجود در شهر یا حومه آن، از شبکه‌های شرکت‌های روشنایی دارنده امتیاز، گرفته نمی‌شد. این نیرو در همان کارگاه‌ها به توسط ماشینهای بخار، که محورهای انتقال حرکت را می‌گردانیدند، یا به توسط موتورهای گازی، که لااقل در شهر پاریس از سالهای ۱۸۸۰ کارگاه‌های کوچک از آنها استقبال می‌کردند، تولید می‌شد. کارخانه‌های بزرگ از هر دو منبع انرژی استفاده می‌کردند، اما به‌طور کلی، دستگاه‌های گازساز خود را داشتند. این کارخانه‌ها برای برآورده ساختن نیازهای خود، برق تولید می‌کردند. همه این تأسیسات موتورهای بخاری یا گازی، متضمن سرمایه‌گذاریهای هنگفتی بودند، مصالح محکمی داشتند و به‌طور کلی، مدتی بیش از نیم سده بخوبی کار کردند. از سوی دیگر باید گفت که هزینه تولید انرژی که مستقیماً از این ماشینها بوسیله موتورهای حرارتی (با هوای گرم) به‌دست می‌آمد بسیار ارزانتر از آن بود که پس از تبدیل به برق به‌کار می‌گرفتند. انشعاب روی شبکه‌های شرکت‌های دارنده امتیاز برق، از سوی

رؤسای کارگاهها، تنها برای روشنایی کارگاهها و فروشگاهها پذیرفته می شد آن هم زمانی که نیروگاه خود را نداشتند.

بالین حال، تحول جغرافیایی صنایع پاریس، که حدود سال ۱۸۵۰ شتاب تازه ای یافت - شتابی که هنوز هم ادامه دارد - به سود پیشرفت در امر توزیع برق هم در محدوده شهری و هم در حومه بود. تا آنجا که می توان تحلیل کرد، وضع چنین بود. در سالهای ۸۰ در محله های مرکزی شهر، دیگر هیچ کارگاه تولیدی یا تبدیلی مهمی نبود. صنعت پاریس جز در محله های غربی که اعیان نشین باقی مانده بودند، به اطراف آن منتقل شده بود. صنعت، در خارج از کمر بندها، در حومه پاریس، بویژه در شمال و جنوب شرقی متمرکز شده بود. این جابه جایی های صنعت، انگیزه توسعه سریع روستاهای کوچک قدیمی شد؛ در همان حال حومه های دیگر، مثلاً در شمال غربی، تبدیل به مناطق مسکونی شدند و تراکم جمعیت در آنها متناسب با پیشرفت وسایل جابه جاسازی افزایش یافت. بیشترین مناطق عاری از وسایل تولید و توزیع گاز روشنایی بودند که می توانست به نیازهای گوناگون خانه ها و کارگاهها بلاواسطه پاسخ دهد. حدود سال ۱۹۱۰ که کاربرد جریان سه فاز آغاز شد، کارگاههایی که بتازگی استقرار یافته بودند، یا در پی جابه جایی از یک محله پاریس به حومه، یا اینکه تازه تأسیس شده بودند نیروی محرکه برقی خود را از تولیدکنندگان آن تقاضا کردند. بدین ترتیب، شرکتهای تازه ای برای تولید برق ایجاد شد و شبکه های توزیعی خود را با سهولتی بسیار بیش از آنچه که شرکتهای دارنده امتیاز بخشهای پاریس در اختیار داشتند، توسعه دادند. کار توزیع برق به شکل بسیار درهمی تا آغاز جنگ جهانی اول به پیش رفت. این پدیده تا آنجا که به نظر می رسد، در همه شهرهای بزرگ جهان، همین طور بوده است.

آغاز کاربرد برق به عنوان نیروی محرکه برای راه آهن، و نیز به عنوان وسیله کار صنایع شیمیایی و فلزکاری در مناطقی که جریانهای آب تأسیس نیروگاههای هیدروالکتریک را ممکن می ساخت، به مطالب بالا افزوده می شود. در فرانسه، تجهیزات هیدروالکتریکی، که پیشرفت آنها در اوایل این سده کند بود، طی جنگ جهانی اول، بسرعت توسعه یافت. این جنبش تا حدود سال ۱۹۶۰ از پا نایستاده است.

بهای روشنایی برق: بهای مصرفی برق مدتهای زیاد گرانتر از وسایل روشنایی بود. دیده شد که محله های فقیرنشین پاریس، با اینکه در بخشهای بعضی از دارندگان کارخانه های برق بودند تا مدتها از داشتن انشعاب محروم ماندند. روشنایی با برق برای خانه های شخصی تا پایان جنگ جهانی اول در بیشتر کشورهای جهان، یک تفنن بود.

آماری از سال ۱۹۱۰ مقایسه‌های زیر را به دست می‌دهد:

- یک لامپ ۱۶ شمعی که هر شمع چهار وات مصرف می‌کند و هزار ساعت دوام دارد، برای هر ساعت روشنایی هزینه‌ای حدود ۰/۴۴ تا ۰/۵۷ فرانک طلب می‌کند؛
- یک لامپ پیشرفته‌تر، تنها سه وات برای هر شمع مصرف می‌کند و هفتصد ساعت دوام دارد، برای هر ساعت روشنایی هزینه‌ای حدود ۰/۴۲ تا ۰/۵۳ فرانک طلب می‌کند؛
- بهای هکتوات - ساعت، حدود ۰/۱۱ تا ۰/۱۴ فرانک است؛
- یک شیپوره آوژ، که ۱۰ شمع نور دارد، هزینه هر ساعت کار آن ۰/۱۵ فرانک است؛ (اگر بهای هر متر مکعب گاز ۰/۳۰ فرانک باشد)؛
- اما یک مشعل شعله پهن، که قویتر است، در هر ساعت ۰/۴۲ فرانک هزینه برمی‌دارد که برابر لامپ برقی است.

با این همه، برق از همان سالهای نخست کاربردش، حتی در دوران لامپهای قوسی، بی‌درنگ به ارزش والایی دست یافت. زمانی که فروش صنعتی آن آغاز شد، مالکان آن همواره مشتری داشته‌اند. در برهه سالهای ۱۸۱۵ - ۱۸۳۰، که شرکتهای تولیدکننده گاز روشنایی غالباً ورشکست می‌شدند، چنین حوادثی با شرکتهای تولید برق در سالهای ۱۸۸۰ - ۱۸۹۰ کاری نداشت. وانگهی خریدهای متعدد و ادغام شرکتهای، مشخصه این دوره را تشکیل می‌دهند. برق صنعتی حتی پیش از آنکه کارایی اقتصادی خود را ثابت کرده باشد گویا در جهانی گام نهاد که آن را نوعی کالای مصرفی، نه همیشه ضروری، ولی به‌طور روزافزونی مورد نیاز تلقی می‌کردند. کثرت کارگاهها و سیستمها تا سالهای ۱۹۲۰ مؤید این ادعاست.

افزایش بخشها: آقای ژ. - ا. مونپلیه<sup>۱</sup> مهندس فرانسوی، بررسی کاملی از وضع فرانسه در سال ۱۹۰۸ تهیه کرده است؛ این وضع تا شروع جنگ جهانی اول دستخوش هیچ تغییری نشد.

تعداد ۱۴۱۳ کارخانه تولید برق برای توزیع با استفاده از خطوط عمومی در آن زمان فعالیت داشتند؛ نیروگاههای اختصاصی بعضی صنایع در این رقم، ملحوظ نشده‌اند. این کارخانه‌ها ۲۹۱۲ محل را تغذیه می‌کردند. در این زمان برق از گاز پیشی گرفته بود که ۸۲۴ کارخانه در تولید آن فعال بودند و تنها به ۱۲۰۹ محل گاز می‌رسانیدند. این ارقام آشکار می‌سازد که شمار زیادی از محله‌های شهر، در نواحی تولید هیدروالکتریک قرار داشتند و در چنین حالتی توزیع برق بسیار آسانتر از توزیع گاز است.

تجهیزات ناقص آبشارها، بیشتر بدین علت بود که بیشتر نیروگاهها، (۸۳۱ نیروگاه) هیدرولیکی

بودند. در مورد توزیع برق باید گفت که ده سیستم مختلف فعال بودند، علاوه بر آنها، تفاوت‌های بی‌اهمیتی، مثلاً در مورد تعداد کابل‌های توزیع، بسامد جریان‌های متناوب و غیره به گوناگونی سیستم‌ها اضافی می‌شد.

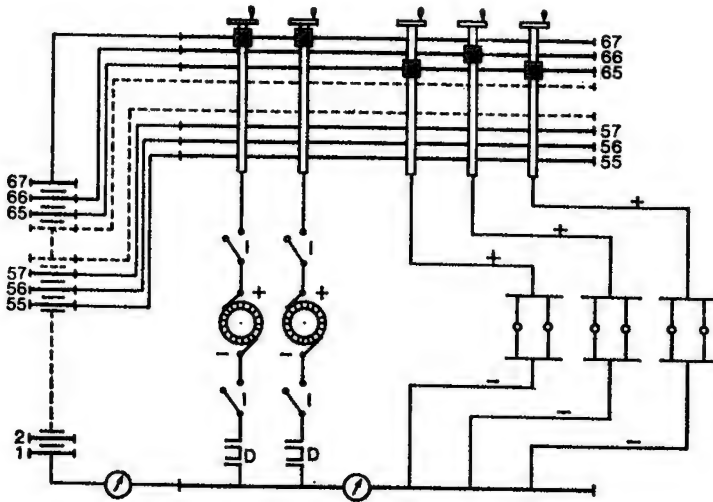
جریان مستقیم هنوز و پس از این هم، بیشتر به کار گرفته می‌شد (۹۴۲ بخش)، و جریان متناوب، به سه شکل خود- تک فاز (۱۵۷ بخش)، دوفاز (۲۰ بخش) و سه فاز (۲۵۶ بخش) - رفته رفته مهم می‌شد. برخی از بخش‌ها با توزیع مختلط، مستقیم و متناوب؛ تکفاز، دوفاز (یک بخش) و سه فاز تأمین می‌شدند.

برق ایالت ایزر که از نظر آبشار غنی است با ۱۶۶ محله خود بخوبی تأمین شده بود. این ایالت، برق را از ۵۶ کارخانه تولید آن دریافت می‌داشت. در منطقه پاریس که شمار شرکت‌های دارنده امتیاز روزافزون بود تا به حومه برق برسانند، کار مهم همانا توزیع برق سه فاز بود. برای اینکه بتوانیم نوع مشکلات موجود را بدانیم خوب است به مبحث تکامل تکنیک‌های نخستین توزیع بازگردیم. به دنبال تکامل توزیع، انتقال و کاربرد برق، همیشه با مجموعه دشواری‌های تازه‌ای روبه‌رو بوده‌ایم که حل آنها ضامن عبور از یک مرحله به مرحله بعدی است.

تنظیم با آکومولاتور: تنظیم ولتاژ یکی از دشواری‌های عمده‌ای بود که می‌بایست از همان آغاز توزیع برق از کارخانه به خانه‌ها، به شکل کم‌ویش رضایت‌بخشی عملی می‌شد. این دشواری، ویژه توزیع جریان مستقیم نبود اما می‌بایست نخست برای این نوع جریان حل می‌شد، زیرا نخست از این جریان استفاده به عمل می‌آمد.

نخستین رگولاتورها که یا با جابه‌جا کردن جاروبک‌های دینام‌ها یا با عمل کردن روی دینام راه‌انداز کار می‌کردند آن قدر سریع و دقیق نبودند تا در شرایط کاری مولدهای متعددی که با میله‌های آغاز خطوط اتصال موازی دارند، بتوانند با تغییرات ناگهانی با بار برقی مقابله کنند.

همچنین در مورد نیروگاه‌های پاریس دیدیم که برای اجرای این وظیفه از آکومولاتور به فراوانی استفاده می‌شد (شکل ۷۴). در انگلستان روش بسیار اساسی‌تری را روی شبکه‌ای که بوسیله آدموندز طرح شده بود پیاده کردند. باتری‌های آکومولاتوری را به مشتری واگذار می‌کردند. آنها به دو بخش تقسیم شده بودند که هنگامی که یکی روشنایی را تأمین می‌کرد دیگری شارژ می‌شد. جابه‌جاگر (کموتاتور) ها اتصال‌ها را متناوباً معکوس می‌کردند. این سیستم مقتضی نگاهداری پیچیده و گرانی بود و پیشرفت چندانی نیافت. با این همه، ۲۵ سال بعد باز در پاریس یک سرویس «روشن‌سازی متناوب آپارتمان‌ها» دیده شد که آکومولاتور نوع تودور<sup>۱</sup> آن را تغذیه می‌کرد. هر ماه یک باتری کوچک



شکل ۷۴. ترسیمه توزیع برق در یک کارخانه پاریس با تنظیم بوسیله آکومولاتور.

در وسط دومولد نموده شده اند. در سمت راست، سه فیدر توزیع که به تأسیسات روشن سازی وصل می شوند رسم شده اند. برگشت جریان بوسیله مفتولهای مشترک در پایین تصویر انجام می گیرد. تنظیم جریان بوسیله مفتولهای شماره ۵۵ و ۶۷ تأمین می شود که یا از طریق مولدها، یا با باتریهای آکومولاتورها که در سمت چپ تصویر با همان شماره ها نموده شده اند، عملی می شود. این شبکه به مقتضای احتیاج می تواند یا با آکومولاتورها تغذیه شود (در حالتی که در شکل آمده است بوسیله باتریهای ۶۵ و ۶۶)، یا با مولدها. چنانچه کموتورها را به طور عمودی جابه جا کنیم، باز می توانیم آکومولاتورها را، چه هنگامی که مولدها بیش از مصرف فیدر، برق تهیه می کنند، چه در صورتی که مولدها به شبکه اتصال ندارند، از نو شارژ کنیم.

شش ولتی به جای آن می گذاشتند تا سه لامپ را روشن نگاه دارد.

آکومولاتور پلاتنه در اندک مدتی تبدیل بوسیله ای شد که در هر اندازه ای کاربرد زیاد داشت. در این دوره جهت تنظیم برق، عمدتاً از آکومولاتور استفاده می شد. همان سال ۱۸۸۵ باتریهای مهم ۱۱۰ یا ۱۲۰ ولتی می توانستند همه توان یک شبکه را در آغاز خطوط تأمین کنند. کیفیت آکومولاتورها و تکنیک کاربرد آنها در حدی بود که در سال ۱۸۸۷ تردیدی به خود راه ندادند که برای پاریس طرح کاملی از روشن سازی با کمک آکومولاتورها پیشنهاد کنند که در آن استفاده از ۶۲۰۰ آکومولاتور پیش بینی شده بود. سطح مفید هر آکومولاتور شش مترمربع بود. بودجه کل این طرح به ۱۱۰۰۰۰۰ فرانک بالغ می شد. برای شارژ کردن این آکومولاتورها ۱۰ دینام لازم بود که با

اتصال موازی راه اندازی می شدند و نیرویی با فشار ۴۵۰ ولت و ۱۵۰۰ آمپر، با ۲۰۰ دور در دقیقه ایجاد می کردند و هر دینام را یک موتور بخار ۳۰۰ اسبی می گردانید. قدرت مفید آنها ۲۴۰۰ اسب بود و تهیه کنندگان این طرحها اطمینان می دادند که می توان ۵۶۰۰۰ لامپ ۱۰۰ ولتی و ۳/۰ آمپر را با نصب ۵۰ کیلومتر خطوط اصلی با مقطع ۲۵۴ میلیمتر مربع و ۵۰۰ آمپر، روشن کرد.

شبکه های دو کابلی: در واقع این توزیع برق بوسیله آکومولاتور، برای مصارف کم و مسافتهای کمتر از یک کیلومتر مناسب بود. این روش تا سال ۱۹۱۴ با مولدهای ۲۰۰ کیلوواتی ادامه یافت. این خطوط را یا دینام، یا باتریها یا در صورت نیاز، هر دو وسیله تغذیه می کردند. تجهیزات آنها شامل یک کلید (کموتاتور) باتری بود که وارد مدار کردن بخشی از باتریها در حالت شارژ یا تخلیه را ممکن می ساخت و نیز یک گروه ترانسفورماتورهای بالا و پایین برنده ولتاژ.

ضخامت این کابلها ثابت و چنان حساب شده بود تا افت ولتاژ برای دورترین گیرنده ها از ۵٪ بیشتر نباشد. هر واحد تولید برق، طبق روش بسیار رایج، از دو سیم تشکیل می شد.

پس از یک دوره کوتاه توزیع با ۶۰ ولت، فشار سرعت به ۱۱۰ ولت بالا برده شد. در آن زمان در نظر داشتند برای خطوطی که از کیلومتر طولانیتر هستند از ۲۲۰ ولت استفاده شود؛ اما آزمایش این کار به علل گوناگونی، نتیجه ای بسیار تردیدآمیز داشت. لامپهای ۲۲۰ ولتی بازدهی کمتر از لامپهای ۱۱۰ ولتی داشتند. موتورهای کوچکی، نظیر چرخهای خیاطی، که در آن زمان تنها ماشینهای خانگی بودند عایق سازی بسیار مشکلی داشتند و خطر برق گرفتگی زیاد.

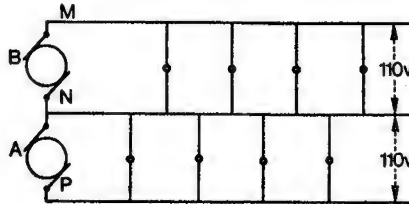
شبکه های سه و پنج کابلی: در مراکز بزرگ، سرعت از سیستمهای تکامل یافته تری برای مولدهایی که قدرت آنها در سال ۱۹۰۰ به ۱۰۰۰ اسب می رسید استفاده شد.

دیده شد که از میان شرکت های پارسی، بعضیها، از جمله کنتینانتال ادیسن، به سیستم توزیع سه کابلی و عده ای نیز به پنج کابلی روی آوردند.

سیستم سه کابلی را آقای جان هاپکینسون بررسی و توصیه کرده بود. این سیستم کاربرد دو دینام ۱۱۰ ولتی دارای یک نقطه مشترک را که با اتصال زنجیری کار می کردند متضمن بود. کابل مرکزی به نقطه مشترک وصل می شد و دو کابل دیگر به دو نقطه انتهایی دو دینام (شکل ۷۵). بدین ترتیب، بین هر کابل خارجی و کابل مشترک، ولتاژ ۱۱۰ بود و بین دو کابل بیرونی ۲۲۰ ولت. یک گروه مولدهای کمکی می توانست به طور تکمیلی روی پلی بسیار باردار سوار شود.

آقای ایلاپهو تامسن، سیستم سه کابلی پیچیده تری را پیشنهاد کرد. یک دینام ۲۲۰ ولتی به کابل های بیرونی وصل می شد. یک گروه کمکی، شامل دو ماشین ۱۱۰ ولتی که بر روی یک مجور





شکل ۷۵. توزیع سه سیمی با دو دینام. سیم نول، N، هیچ جریانی ندارد.

نصب شده بودند و القاگیرهای آنها با اتصال زنجیری به یکدیگر مرتبط می‌شدند، با مدار  $220^\circ$  ولتی اتصال می‌یافت. کابل سوم به نقطه مشترک دو ماشین گروه کمکی وصل می‌شد. چنانچه یکی از پلهای  $110^\circ$  ولتی بیش از دیگری بار می‌شد، فشار آن به پایین‌تر از  $110^\circ$  افت می‌کرد و دینامی که بدان اتصال داشت به‌عنوان ژنراتور فعال می‌شد و دینام دیگر همچون موتور دینامی کار می‌کرد. این گروه ماشینها بدین ترتیب انتقال انرژی را از یک پل به دیگری تأمین می‌کرد. این سیستم برگشت‌پذیر بود.

ترکیبهایی از همین نوع، برای پاسخ به نیازهای بسیار اساسی، پس از اندک مدتی، ساخت سیستم پنج کابلی را با یک گروه کمکی دارای چهار القاگیر ممکن ساختند (شکلهای ۷۶، ۷۷، ۷۸).

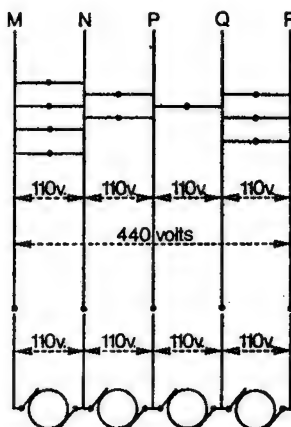
شبکه توزیع میدان کلیشی<sup>۱</sup> واقع در پاریس، این‌گونه تغذیه می‌شد. تنظیم شبکه: برای پیشگیری از قطع کلی جریان در یک شبکه در صورت بروز یک حادثه محلی، سیستم حلقه‌ای کردن خطوط را با سرعت تعمیم دادند. مثلاً یک شبکه سه کابلی با گروه ماشینهای کمکی شامل دو فیدر بود که مولدها را به دو سر خط وصل می‌کردند. با این ترتیب امکان تغذیه یک خانه، از طریق این یا آن سر خط، تأمین می‌شد.

این سیستم در شهرهای بزرگ رفته‌رفته پیچیده شد تا آن حد که شبکه‌هایی توری-شکل ساخته شد که بعضی از گره‌ها از طریق فیدرها به نیروگاه اتصال داشتند.

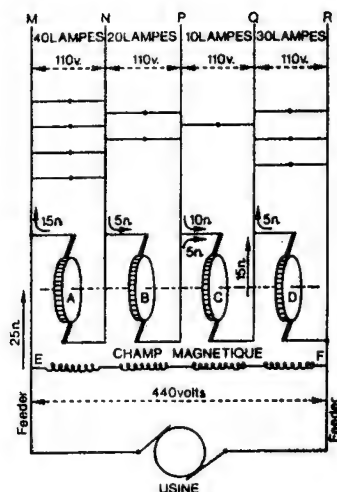
طی حدود پانزده سال، سیستم یک مولد از طریق فیدر، جای خود را به «شین اصلی»<sup>۲</sup> واگذاشت که همه دینامها به‌طور موازی بدان متصل، و همه فیدرهای توزیع از آنجا شروع می‌شدند. تعداد دینامها متناسب با مقدار انرژی مورد تقاضا از شبکه تغییر می‌کرد. در ممالک متحده آمریکا،

1. Clichy

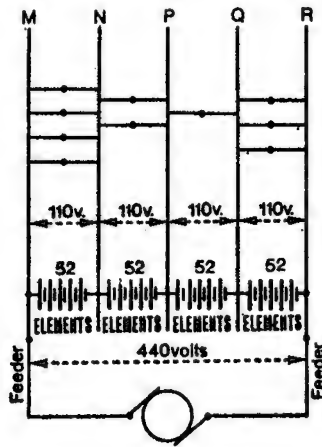
۲. omnibus bar یا bus bar مفتول یا شمه مسی ضخیمی که در تابلو برق، حامل یکی از جریانهای اصلی



شکل ۷۶. توزیع پنج سیمی با چهار دینام.  
این سیستم به علت هزینه بالای اجرای کار، با سیستمهای که در شکلهای ۷۷ و ۷۸ نموده شده اند تعویض شده است.



شکل ۷۷. توزیع پنج سیمی با یک دینام ۴۴۰ ولتی و چهار دینام تنظیم کننده ۱۱۰ ولتی که روی یک محور نصب شده اند و می توانند برحسب نیاز بخش، در نقش گیرنده یا مولد عمل کنند.



شکل ۷۸. توزیع پنج سیمی با یک دینام ۴۴۰ ولتی و چهار باتری آکومولاتور، که برحسب نیاز بخش می‌تواند برق بدهند یا شارژ شوند.

که از همان ابتدای کار، آن را که با دینام ۱۲۵ اسبی ادیسن مجهز بود، بزرگ یافتند بهتر دیدند که زمانی که قدرت مورد نیاز رو به افزایش دارد شمار مولدها را از ۲۵۰ اسب مثلاً به ۵۰۰ اسب برسانند تا اینکه واحدهای بزرگ را به‌کار گیرند.

شبکه‌های شهری از همان آغاز تشکیل، دارای ایستگاههای فرعی بودند که در مرکز تراکم محلات تحت پوشش ساخته می‌شدند. این ایستگاهها، برق را توسط یک فیدر اصلی از نیروگاه دریافت می‌کردند، ولتاژ آن را، در صورت نیاز بوسیله یک تبدیلگر (کموتاتور) کاهش می‌دادند و هرکدام مثلاً یک شبکه سه کابلی را تغذیه می‌کردند. باتریهای آکومولاتورها را در آن زمان در همین ایستگاههای فرعی در اتصال موازی با گروه ماشینهای کمکی قرار می‌دادند و نقش فرستنده انرژی به آنها می‌دادند.

توزیع جریان متناوب: توزیع جریان متناوب، با وجود تفوق جریان مستقیم که تا اواخر سالهای ۲۰ این سده ادامه داشت، از همان سالهای نخستین عمل می‌شد. نخست از جریان متناوب تک‌فاز، سپس از سال ۱۸۹۱ از جریان دو یا سه فاز استفاده می‌شد. همان اصول کلی حاکم بر جریان مستقیم در این زمینه نیز وجود دارند: سیستم حلقه‌ای، فیدرها، نیروگاههای فرعی. برتری جریان متناوب بیدرنگ آشکار شد. انتقال این جریان با فشار قوی - برای پرهیز از اتلاف

در خط - آسانتر انجام می‌گرفت. ولتاژهای انتقال در آغاز ۳۰۰۰، بعد ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ بود و در سال ۱۹۱۰ به ۱۵۰۰۰ ولت رسید.

ترانسفورماتورهای ثابت که در محل نیروگاه و در مرکز پیش از انشعاب برق به مشتری کار گذاشته می‌شد هیچ‌گونه مراقبت دائمی نیاز نداشت. این امر سبب شد که بی‌درنگ، در پیاده‌روها یا در زیرزمین خانه‌ها، پستهای فرعی کوچکی با تنها یک ترانسفورماتور خانگی کار بگذارند. اتصال زنجیری ورودیها ترانسفورماتورها شروع شد. سپس ترتیب درست‌تری از اتصال موازی ورودیها پذیرفته شد و در شهرها دو نوع شبکه دیده می‌شد: فشار قوی و فشار ضعیف، روبه‌روی یکدیگر.

شبکه‌های مختلط، متناوب و مستقیم را هم می‌شد برقرار کرد که دیگر از دینام و آلترناتور تغذیه نمی‌کردند، کاری که مثلاً ادیسن در پاریس کرد؛ بلکه در آغاز توزیع، صرفاً از آلترناتور با ترانسفورماتورهای بالابرده ولتاژ تغذیه می‌کنند، و در پستهای فرعی، از ترانسفورماتورهای پایین‌آورنده ولتاژ و کوموتاتورهایی که جریان مستقیم با فشار ضعیف به شبکه می‌دهند.

بسامدهای جریان متناوب، برپایه معیارهای تغییرپذیری بوسیله شرکتها انتخاب می‌شدند. در شبکه‌های اروپایی، بسامد رایج، بیشتر ۲۵، ۴۰ یا ۵۰ دور بود و بیشتر بسامدها را می‌شد در شهرهای بزرگ منطبق کرد. در امریکا از سیستمی برپایه ۱۲، بسامد ۶۰ دور استفاده می‌شد.

در کشوری مانند فرانسه، تنوع بسامدها برای سازندگان وسایل برقی، دردسر بود - در دسری که تا شروع نیمه دوم این سده ادامه داشت. بخشی بزرگی از مناطق کنار دریای مدیترانه با ۲۵ دور در ثانیه کار می‌کردند، در حالی که مناطق دیگر رفته‌رفته بسامد ۵۰ دور را پذیرفتند. یکی شدن بسامد روی ۵۰ دور، که در سال ۱۹۴۹ پذیرفته شد تا سال ۱۹۵۵ به پایان نرسید.

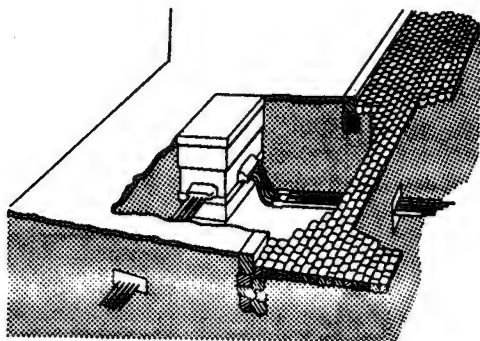
مشکل دیگری از یکنواخت شدن، در آغاز نیمه دوم همین سده، ولتاژ برق توزیعی به مصرف‌کنندگان جریان متناوب بود. صنایعی که مصرف برق در آنها همچون ماده خام به شمار می‌آمد، مانند: صنایع شیمیایی، صنایع سیدرورزی (آهنکاری)، همیشه برق فشارقوی را، حتی در زمانی که این ولتاژ به چند هزار می‌رسید، به کار می‌گرفتند. این صنایع، که برق نیروی محرکه آنها بود، اینک آن را در فشار متوسط ۱۵ تا ۲۰ هزار ولت دریافت می‌داشتند، و همان‌طور که گفته‌ایم، این کاربرد برق، تنها با آغاز دوره‌ای که فاصله بین دو جنگ جهانی را می‌پوشاند توسعه یافت. علت این امر عمومیت یافتن شبکه‌های انتقال و توزیع برق در همه کشورهای صنعتی بود. این فرایند تکنیکی طبعاً با پیشرفت باز هم سریع ساخت وسایل الکترومکانیکی دنبال شد. موتور برقی، گیرنده بسیار شناخته شده انرژی برق است. این موتور عملاً برای همه کاربردهای احتمالی در کارگاههای متعدد تولید جدید انطباق یافته است. ساخت این وسیله در مدت اندکی به مقیاس زیاد بوسیله

کارخانه‌هایی که بازارهای جهانی را تسخیر کرده‌اند تأمین شد. هم‌چنین، پس از جنگ جهانی دوم، از زمانی که برق عملاً جانشین همه اشکال دیگر انتقال انرژی در صنعت شده است، اتحادیه‌های بین‌المللی در بخش توزیع، مسؤول یکنواخت کردن مشخصات وسایل برقی شده‌اند.

همین عوامل برای یکنواخت شدن توزیع برق فشار ضعیف جهت کارهای خانگی فشار می‌آورند. از زمان جنگ جهانی دوم، بر حجم و گوناگونی وسایل برقی خانگی افزوده شده است. تولید این وسایل که در پایان سالهای ۳۰، کمی صنعتی شده بود، با آغاز سالهای ۵۰ به صنعتی بار شد سریع تبدیل شد. این هجوم وسایل جدید خانگی با پیشرفت مواد سنتزی ساخت صنایع شیمیایی بستگی داشت. اتحادیه‌های جهانی صنایع به بالا بردن ولتاژ فشارهای ضعیف، که از فشارهای قدیم ۱۱۰ به ۲۲۰ بین فاز و نول و ۳۸۰ بین دو فاز رسیده بود رهنمون شدند. این یکنواختی که در سال ۱۹۶۰ در فرانسه پذیرفته شد با آهستگی ادامه یافت.

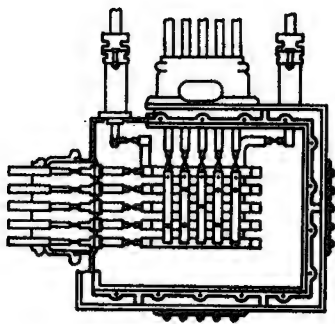
لوازم انشعاب: شبکه توزیع معمولاً در محل مشتری با انشعاب از خطوط بخش پایان می‌گیرد. همه شرکت‌های دارنده امتیاز ناگزیر به ساخت لوازم ویژه‌ای برای اجرای این مراحل نهائی توزیع بودند. دیدیم که آقای ادیسن، پایه لوازم کار خود را بر بهتر کردن وسایل اولیه قرار داد. گرچه همراه با زیاد شدن شرکتها، از همان سالهای نخست، تنوع اجسام ساخته شده ویژه این کار بسرعت فزونی گرفت، جالب است بدانیم که اصول اولیه عملاً دستخوش تغییری نشد: جعبه‌های چدنی انشعاب، در محل که درب آنها آسان باز می‌شد و اتصالات کابل‌های اصلی با کابل‌های انشعاب که با انبرک‌های مسی یا با پیچ یا با وسیله فشاری دیگری انجام می‌گرفت. مقطع یا انتهای کابل‌ها عریان بودند. جعبه انشعاب خانه‌ها را بی‌درنگ با فیوز حفاظتی مجهز می‌کردند (شکل‌های ۷۹ و ۸۰).

در همین دوره بود که غلم (رایزر)‌های خانه‌ها، که در آن زمان از افزارهای چوبی شیارداری تشکیل می‌شد که کابل‌های عایق شده با پارچه‌های پنبه‌ای پارافین خورده یا کائوچوی وولکانش شده در آن گذاشته می‌شد، و نیز جعبه‌های انشعاب برای هر مشترک که آنها نیز دارای فیوزهای حفاظتی برای هر تأسیسات خصوصی بودند، رواج یافتند. همه جعبه‌های چدنی، با اتصال به زمین مجهز بودند. گوناگونی لوازم انشعاب، از یکسوی نتیجه شکل جریان و روش توزیع بود: برای جریان مستقیم، توزیع دو، سه یا پنج کابلی انجام می‌شد و برای جریان متناوب، کاربرد یک ترانسفورماتور در خانه مشترک الزامی بود. مقرراتی در اوایل کار، گذاردن ترانسفورماتور در کانال‌های زیر پیاده‌روها را منع می‌کرد. استانده کردن کارها با کندی زیاد و بتدریج که تعداد شرکت‌های توزیع کاهش می‌یافت انجام می‌گرفت. برای مجتمعی نظیر پاریس و حومه آن تنها یک شرکت در سال ۱۹۲۰ به نام شرکت توزیع



شکل ۷۹. کانال زیرزمینی با جعبه انشعاب، در پاریس.

برق در پاریس، برای خود شهر و چهار شرکت دیگر وابسته به آن، برای حومه خدمت می‌کردند. یک‌نواختی کلی، تنها پس از جنگ جهانی دوم آغاز شد، زمانی که انحصار تولید، انتقال و توزیع برق به یک شرکت ملی شده به نام: برق فرانسه، که کمی بعد به: برق و گاز فرانسه تغییر نام یافت واگذار شد. مدیریت فنی و اقتصادی همه این تأسیسات، از این پس مستلزم یک همکاری در مقیاس وسیع بود که، همچنانکه بعدها خواهیم دید، از محدوده مرزهای سیاسی می‌گذشت. محاسبه مصرف: در این باره می‌توان گفت که در یک مدت کوتاه، وسایل متعدد دیگری، نه تنها طراحی، که در مقیاس صنعتی ساخته شدند. از آن جمله وسایلی بودند که برای محاسبه مصرف - مسأله‌ای که در آن زمان حل آن بسیار دشوار بود - به کار گرفته شدند.



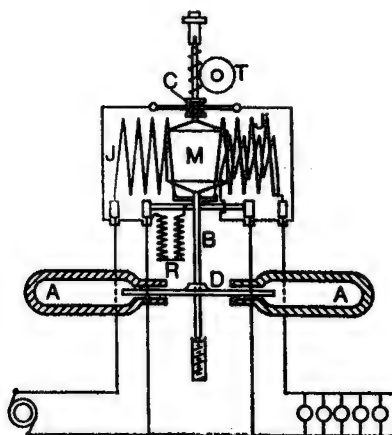
شکل ۸۰. نمایه یک جعبه انشعاب.

کنتورهای الکترولیزی ادیسن، نوعی راه حل شانس بود که تنها در مدت کوتاه راه افتادن، که تعداد مشتریان نسبتاً کم بود، مفید واقع شد. بعضی از شرکتها، در آغاز از اصل مقاطعه استفاده کردند و وجه دریافتی بستگی به تعداد لامپها یا موتورهای کوچک (هنوز بسیار نادر) هر مؤسسه شخصی و نیز مدت تخمینی کار روزانه آن داشت. برای جلوگیری از تقلب، گاهی از محدودکننده های شدت استفاده می شد که جریان برق را در صورت تجاوز از حد، به طور خودکار قطع می کرد. برای این کار ابزارهای گوناگونی پیشنهاد شدند.

راه حل دیگری برای شانه خالی کردن از شمارش، این بود که طی روز تنها چند ساعت برق داده شود و این محدودیت به کمک وسایلی از قبیل آنچه که «سازره»<sup>۱</sup> نام داشت انجام می گرفت. وسیله ای که تغذیه و قطع را با بسامد بالا تأمین می کرد و از نیروگاه به آن فرمان داده می شد. سرانجام، راه حل بسیار ساده توزیع جریان برای روشن سازی به شکل مقاطعه، بدون محدودیت در نواحی کوهستانی دارای مراکز هیدروالکتریک معمول شد. در این نواحی، مصرف شخصی در برابر مقدار مصارف صنعتی قابل اعتنا نیست. این روش در بعضی از دره های آلپ، در اوایل سالهای ۲۰ هنوز هم اجرا می شد.

با این حال، همه این سازشهای می بایست جای خود را بروشهای کارآمدتر محاسبه واگذارند، کاری که در بیشتر جاها پیش از پایان سده نوزدهم انجام گرفت. در همین زمان است که نخستین کنتر جریان مستقیم که مصرف را برحسب وات مستقیماً روی صفحه خود نشان می داد طرحریزی شد. این وسایل که مصرف کننده های واقعی بودند و قطعه ای در آنها، با مصرف برق می گردید، خودشان تنها مقدار ناچیزی از انرژی را مصرف می کردند، اما نظم کاری آنها به مشتری اعتماد کامل القا می کرد.

تا پیش از سال ۱۸۹۰ ترتیبات گوناگونی به کارگرفته شدند. در فرانسه کنتر آرون<sup>۲</sup> دارای دو آونگ هم مدت (isochrone) بود که یکی قرقره ای از سیمهای ظریف داشت که قرقره دیگری از سیمهای ضخیم آن را دفع می کرد و در نتیجه، حرکت آن سرعت می گرفت. آونگها هریک در جهت مقابل یکدیگر، نوعی حرکت ساعتی را تحریک می کردند که متناسب با حاصل ضرب EI (فشار × شدت) به پیش می رفت. این مکانیسم و موتازهای برقی آن بسیار پیچیده بودند اما آقای آرون توانست نمونه های محکم و دقیقی از آن را بسازد. از سوی دیگر، وی بدون اینکه اصل کلی را زیر پا بگذارد انواعی از آن را ساخت که با همه سیستمهای توزیع، و بعدها با تمام اشکال جریان برق جور می شدند.



شکل ۸۱. کنتور-موتور ساخت تامسن.

از یک موتور کوچک تشکیل شده است که  $M$  القاگیر و  $J$  القاگر آن جریان مورد نظر را از خود می‌گذرانند. این جریان بوسیله میله  $B$ ، دیسک آلومینیمی  $D$  را بین قطبهای  $A$  دو آهنربای دائم می‌چرخانند. این دو آهنربا اثر ضد نوسان فازها را دارند. قطعه  $T$  که در بالای شکل دیده می‌شود، دور شمار است.

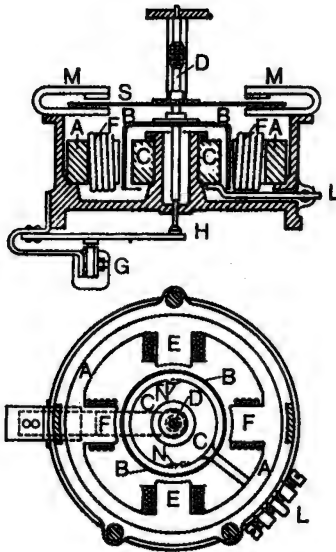
آقای بریلیه کنتوری طرح کرد که مقدار وات در ساعت را می‌سنجید. جریان متناوبی که شدت آن متناسب با شدت جریان توزیع شده بود از قرقره‌های متحرک آن می‌گذشت و برای قرقره متحرک، با ولتاژ آن تناسب داشت. محور قرقره اخیر حامل یک دیسک مسی بود که تحت تأثیر دو آهنربای دائم، با سرعت متغیری برحسب موقعیت قرقره متحرک می‌چرخید. کوپل مقاومت، که نتیجه جریان فوکو بود، رابطه ثابتی با زاویه انحراف این قرقره داشت.

از میان کنتورهایی که بیش از بقیه رواج داشتند، کنتور آقای تامسن در همان دوران است که دینام کوچکی بود که القاگیر و القاگر آن، هر دو بدون آهن، یکی با اتصال موازی و دیگری با زنجیری با جریان اصلی مربوط می‌شدند.

کوپل آن متناسب با حاصل ضرب  $EI$  بود. یک دیسک مسی که به القاگیر متصل بود تحت تأثیر آهنرباهای دائم نعل اسبی قرار می‌گرفت و از طریق جریانهای فوکو، کوپل مقاومی متناسب با سرعت تولید می‌کرد (شکل ۸۱).

کنتور آرون و نیز کنتور تامسن می‌توانند هم با جریان مستقیم و هم با جریان متناوب تک‌فاز بخوبی کار کنند. زمانی که باید با جریان چند فاز کارکرد کار کمی دشوار می‌شود، اما در آن زمان





شکل ۸۲. کنتور فزاری.

نمای افقی و عمودی: جریان اصلی از قرقره‌های قطبهای F طوقه A می‌گذرد. بوبینهای دارای سیم ظریف قطبهای E با اتصال موازی تغذیه می‌شوند. طبلک B که آلومینیمی است میان این پلها و استوانه C که از آهن نرم است، می‌چرخد. میل پیچ D یک جمع‌زن را فعال می‌سازد. در اینجا سیستم نوسانگر S و M دیده می‌شود. قطعات H و G وسیله‌ای برای کم کردن اصطکاکهای محور هستند.

وسایل مورد نیاز برای این کار، چنان انعطاف‌پذیر بودند که بسرعت تطبیق داده شدند. استفاده از میدانهای چرخان فزاری، بویژه کاربرد اصل موتور ناهمزمان (آسنکرون) را در ساخت وسایل محاسبه ممکن ساخت (شکل ۸۲). طی چند سال مدلهای گوناگونی ارائه و به‌کار گرفته شدند. تکامل کنتورهای برق بعدها نیز برای انطباق با همه نوع کاربرد، ادامه یافت.

وسایل گوناگون دیگری برای تجهیز بخشها لازم آمد: وسایل مانور کلیدهایی که با دست یا با فرمان از دور عمل می‌کردند، دیژونکتورها، وسایل کنترل، وسایل تنظیم و غیره که در دوران نوآوری بسرعت ساخته شدند. پیش از سال ۱۹۰۰ همچنین وسایلی برپایه اصول و با اشکالی که تا نیم سده، عملاً تغییری در آنها راه نیافت طرح‌ریزی شدند. تنها در پرتو دسترسی به مواد جدید بود که کاربرد مصالح فلزی کاهش یافت یا وسایل تازه‌ای، که از میانه همین سده تحولات سریعی را سبب

شدند، بی‌درنگ به‌کار گرفته شدند. همچنین اصلاحات زیادی در دیژونکتورها انجام گرفت، مثلاً در پرتو تغییر نوع کنتاکتها و به‌کارگیری روشهای گوناگون: وزش مغناطیسی قوسهای قطع مدار، قطع مدار در روغن، قطع پنوماتیکی مدار و غیره.

## تحول روشهای تولید برق

ادواری بودن پیشرفت برق صنعتی: توسعه کشش با برق در زمانهای بعد، و پیشرفت برق صنعتی، مبانی کاربرد برق به‌عنوان نیروی محرکه در کارخانه‌ها و کارگاهها، در جنب کمک به روشن‌سازی، عواملی هستند که افزایش پیوسته نیاز به برق را در کشورهای صنعتی موجب شدند. پس از یک دوره بسیار آرام تحول که دو دهه نخستین سده حاضر را می‌پوشاند، دوره دیگری فرارسید که در طی آن، علاوه بر اینکه نخستین گرایشها برای تکمیل وسایل تولید برق بروز کرد، به نقشی که برق قرار است بعدها در همه رشته‌های گروهی و انفرادی داشته باشد نیز آگاهی یافتند. این دوره مقارن دهه‌هایی است که فاصله دو جنگ جهانی را فرامی‌گیرند.

فرایندی که طبق آن این پدیده ایجاد شد، پیچیدگی بسیار دارد. از لحاظی، هنوز چیز دیگری جز استمرار دوره راه‌اندازی، سالهای ۱۸۸۰ - ۱۸۹۰ نیست. اما عواملی با بازتابهای بسیار ژرف آن را تغذیه کرده‌اند. از یکسوی شبهه‌ای نیست که در پایان جنگ جهانی اول، رشته الکتروتکنیک آزمایشهای خود را پشت‌سرگذاشته بود. برای اینکه منزلت آن در متن این عصر معلوم شود، می‌توان گفت که الکتروتکنیک نوعی رسیدگی دست یافته بود، بشرط اینکه مفهوم سیرشدگی یا بی‌حرکی از این واژه استنباط نشود.

ساخت و کاربرد مصالح برقی، در همه سطوح آن، در اختیار وسایلی بود هنوز همه آثار خود را نشان نداده بودند، اما آن‌چنان توانا، که تکنسین‌ها و نیز توده مردم پذیرفتند که این رشته، پایه نیرومندی برای یک مرحله نوین پیشرفت است. از سوی دیگر، مصرف‌کنندگان آینده و دست در کاران سیاست کلی، رفته‌رفته گوش شنوایی از لحاظ امکانات انجام و عده‌های خود یافتند.

جنگ جهانی اول آهنگ رشد الکتروشمی و الکتروماتورژی را بشدت شتابان کرد. در رشته‌های دیگر صنعتی، انرژی انتقال یافته بوسیله الکتریسته، به‌عنوان نیروی محرکه، دارای کاربرد بسیار پراعتاف و متنوعی شناخته شد که الزامات جغرافیایی یا اقتصادی، که از یک سده پیش، پیروی از بعضی صنایع بومی را تحمیل کرده بودند با قدرت از بین برد. اما همچنین، آیا نمی‌بایست این انرژی در همه‌جا در دسترس باشد. بنابراین، به‌سوی تولید زیاد الکتریسته روی آوردند و برای

رسیدن به این منظور آن عده از مناطقی را که از نظر هیدروالکتریسیته مناسب می نمودند شروع به تجهیز کردند و با تکثیر نیروگاههای حرارتی در مناطق صنعتی دور از دسترس مراکز هیدرولیکی، محدودیت انتقال برق به جاهای دور را کاهش دادند.

مقدار مصرف برق در شهرها، برای ادارات، نیازهای خانگی و تفریح، چنان افزایش یافت که توزیع بسیار متراکم شد و بهای تأسیسات و وسایل مصرفی و نیز بهای خود مصرف رو به کاهش گذاشت. روشن سازی با برق، دیگر امتیاز محله های اعیان نشین نبود، برقی کردن وسایل اداری تا اندازه ای، و نیز برقی کردن تجهیزات مجتمع های مسکونی، اعم از خدماتی و تفریحی، آسانسورها، تهویه، نورافکنهای سینماها، تا حدودی انجام گرفته بود. وسایل ارتباطی، تلگراف، تلفن و ایستگاههایی فرستنده رادیویی که در فشرده تر ساختن مردم کشورهای صنعتی در چارچوب نوعی زندگی بر پایه الگوی مصرف برق مؤثر بودند نیز در همین راستا به پیش رفته بودند.

بالاخره در کشورهای اروپای غربی و آمریکای شمالی، دلمشغولی تازه ای پدید آمده بود و آن جلوگیری از مهاجرت روستاها به شهرها بود. شرکتهای صنعتی از این بیم داشتند که شاهد خشک شدن منابع غذایی باشند، هرچند که حدود صدوپنجاه سال بود که سایه قحطی از سرزمین آنها بکلی رخت بر بسته بود.

انتقال برق به روستا به هدف اصلی جلوگیری از مهاجرت روستاییان با ایجاد راحتی بیشتر برای آنان بود که علاوه بر روشنایی با برق، سبک کردن کار کشاورزی، گرچه مقدار کم هم، مورد نظر بود. نتیجه برق رسانیدن به روستا استقرار شبکه های انتقال و توزیع برق در سراسر سرزمین بعضی کشورها بود.

باز در همین برهه فاصله دو جنگ، نوعی تعادل بین جاذبه های یک تکنیک جدید که لزوماً تحول ویژه خود را داشت و نیازهای تازه ای که ایجاد می کرد - بدون برق صنعتی سینما و تلفن بی سیم به وجود نمی آمد - و دغدغه های نیازمندیها و دورنمای سودهایی که برای گسترش الکتروتکنیک متصور بود، چارچوب اقتصادی خوبی فراهم می کرد.

پس از جنگ جهانی دوم، مرحله سوم آغاز شد که روابط عوامل تکامل دهنده برق صنعتی طی آن عمیقاً تغییر یافت. برقی کردن، شرط بنیادین صنعتی شدن و رشد اقتصادی شد. در واقع در این دوره کشف خاصی نشد. این مفهوم رفته رفته در گذر دوران پیش زاینده شده بود. در اتحاد شوروی (سابق)، مثلاً همین که خطرهای بزرگ سالهای پس از اکتبر ۱۹۱۷ برطرف شدند، برقی کردن به یک دگم سیاسی تبدیل شد، و بدین دلیل تولید این کشور که در سال ۱۹۱۳ بیش از

دو میلیارد کیلووات در ساعت نبود در ۱۹۳۰ از هشت میلیارد و در ۱۹۳۸ از ۴۰ میلیارد هم گذشت. در کشورهای صنعتی دیگر، این طرز فکر جدید، با مساعی فراوان خلق تکنیک، که جنگ جهانی دوم انگیزه آن بود تقویت شد. حتی کشوری مانند فرانسه هم، که تحت تأثیر خاص مرحله اول نبردها قرار گرفته بود؛ در زمان جنگ و در شرایط اشغال دشمن هم کارهای برقی کردن یکی از خطوط اصلی راه آهن، خط پاریس به لیون را شروع کرد و با این کار برنامه برقی کردن کلی کشور را که در سالهای ۳۰ آغاز شده بود، پی گرفت.

دلواپسی مربوط به افزایش مصرف، در این مرحله سوم، به عوامل اصلی برای پیشرفتهای فنی در این رشته تبدیل شدند. همین وضع در همه بخشهای کار صنعتی و کشاورزی به چشم می خورد، اما گویا در مورد برق خیلی چشمگیر بود، زیرا برق، مانند شیمی، در راه برطرف ساختن نیازهای بسیار گسترده ای خدمت می کند. این رشته بعدها هم به علت منطق درونی تحولات خاص خود چنین خواهد بود. وانگهی تکنیکهای صنایع بزرگ دیگر، که برق از همان آغاز، با آنها روابط متقابل داشته است، نیز دستخوش چنین تحولی بوده اند: متالورژی، برای تولید کابلها و ترانسفورماتورها؛ شیمی برای تولید اجسام عایق جدید؛ الکترونیک، برای فرمان از دور و اتوماسیون؛ و غیره.

همه این موقعیتها، ضربه انگ تندی از تحول را تحمیل کردند که شتاب آن گویا در روزگار ما هم پایان نخواهد یافت: تحول مولدها و در مقابل طبعاً وسایل برقی که از این پس نمی توان آن را، به تفصیل در این کتاب دنبال کرد. تحول در کاربرد منابع انرژی و تکنیکهای انتقال جریان، که باید کوشید تا خطوط اصلی آن را، برای فهم سرشت این پدیده - به دست دهیم. نیروگاههای جدید حرارتی: برق از همان مرحله اول، در پایان سده گذشته، با تغییر شکل انرژی حرارتی یا انرژی هیدرولیک تولید می شد.

در رابطه با انرژی حرارتی، برق صنعتی این فرصت را داشته است که از همان آغاز کاربرد خود، دو نوع نخستین توربین بخاری، توربین پارسنز و توربین لاول را در اختیار داشته باشد. می توان اندیشید که توربین بخاری این شانس را داشته است که زمانی اختراع شد که کاربرد ویژه ای برای آن آماده بود.

کاربرد دیگری که موفقیت حتمی داشت هماناً حرکت کشتیها بود، که زیاد هم ناگزیر نبود. گرچه موتور کلاسیک پیستونی، چندین دهه فعال باقی ماند، این توربین تنها وسیله تکنیکی بود که قدرت تولیدی نیروگاههای حرارتی را بتدریج افزایش می داد. تحول این بخش از تکنیک، متضمن تغییر شکل تدریجی روشهای تولید بخار بود که هنوز هم ادامه دارد.

انواع تازه دیگهای بخار که به ساخت دستگاههای چندین صدمگاواتی با جریان بسته آب تبخیری و سراسر خودکار، گوناگونی سوختها، برپایه شرایط اقتصادی تأمین آنها برای هر کشور: گرد زغال، لینیت (زغال سنگ قهوه‌ای)، سوخت یا گاز طبیعی منجر شد. این وضع دستکاری مجدد تجهیزات سوختی را ناگزیر می‌ساخت، تا جایی که امکان تعویض یک سوخت با دیگری، طبق شرایط زمان فراهم آمد. مرحله نهائی تا زمان حاضر، تحول نیروگاههای حرارتی، استفاده از توربین گازی است که از سالهای ۶۰ شروع شده است.

افزایش حجم دستگاههای تولید برق، تعدادی محدودیتها را آشکار ساخت: لزوم تأمین مقادیر بیش از پیش سوخت، تأمین آن اساساً از طریق راه آبی و انبار کردن آن روی سطوح بیش از پیش وسیع، حتی در مورد هیدروکربنها؛ کاربرد مقدار قابل توجهی آب برای خنک کردن، که مستلزم شرایط جغرافیایی معینی است؛ تخلیه گازهای سوختی و خاکسترها، در صورت کاربرد سوخت جامد.

مسأله محدود کردن و در صورت امکان از بین بردن، آلودگیهای زیانبخش که محیط دیگر تاب تحمل آنها را ندارد. همه این مسائل، انگیزه آفرینش پیوسته وسایل فنی تازه‌ای بودند: غبارگیری الکتروستاتیکی، جذب اکسیدهای کربن، برجهای مرتفع برای تخلیه فضولات گازی دیگر، برجهای خنک‌کننده آب، استفاده مجدد از خاکسترها. همه این تکنیکهای جذب آثار فرعی، ویژه نیروگاههای حرارتی نبودند، اما کاربرد الزامی آنها، همراه با دیگر عوامل ویژه، در تغییر شکل بنیادی طرح این کارخانه‌ها مؤثر بوده است چیزی که سی یا چهل سال پیش نمی‌توانستند آن را پیش‌بینی کنند. توربینهای هیدرولیک: در مجلد پیش دیدیم که نخستین توربینهای هیدرولیک در چه شرایطی در فرانسه ساخته شدند (مجلد سوم، صفحه ۴۶).

انواع دیگری از توربینها، پس از توربینهای مرکزگیز فورنون و توربینهای (با جریان) محوری اختراعی ژونوال-کوشلن در اندک مدتی ساخته شدند. از توربینهای بسیار رایج می‌توان از توربین ژیرار و نیز توربین اختراعی فونتن-بارون نام برد. این توربینها از نظر اصول کار، یا ویژگیهای درجه‌های آبرو، یا امر توزیع، تفاوت چندانی با انواع پیشین ندارند. توربینهای فرانسوی پیش از سال ۱۸۵۰ تا حدود پایان همان سده، به عبارت دیگر در تمام دورانی که انتقال انرژی، تنها با وسایل مکانیکی انجام می‌گرفت، رواج داشتند.

این توربینها پس از مدت کوتاهی، در زمانی که نیاز به نیروی محرکه در امریکا رشد سریعی یافت، و تأسیسات هیدرولیک در مناطق شرقی امریکا-بویژه در نیوانگلند، که تأسیسات صنعتی

بسیار متعدد و بسیار بزرگ داشت - فراوان شده بودند، به آن کشور صادر شدند. در آن زمان توربینهای گوناگونی شناخته می شدند که بذر تحولی از توربینهای کلاسیک در خود داشتند. بویژه توربین آقای زیبولون پارکر<sup>۱</sup>، در ۱۸۳۰، که نوعی توربین واکنشی یا فشاری غوطه‌ور؛ با دریچه‌های پروانه‌ای بود. این توربین بسیار رواج یافت و بتدریج کاملتر شد و بعدها در ممالک متحده آمریکا آن را چیزی بنیابین توربین و چرخاب افقی با جریان مارپیچ (tub-wheel) دانستند.

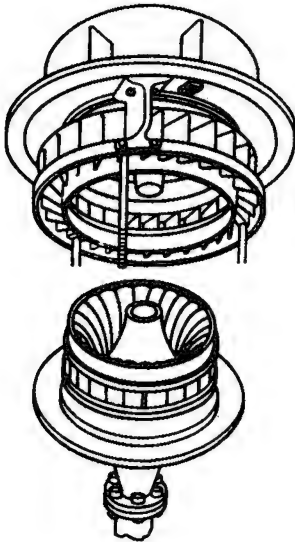
توربین فرانسیس: امریکایی کارورز دیگری با نام سمیوئل ب. هاود در ۱۸۳۸ امتیازی برای یک توربین واکنشی (فشاری) دریافت داشت که در اساس با توربینهای فرانسوی این تفاوت را داشت که آب از پهلوها به آن وارد، و به طرف محور مرکزی گودش هدایت می شد. این نوع توربین مرکزگرای بود که جیمز ب. فرانسیس، چند سال بعد، آن را به توربینی تغییر شکل داد که مناسب آبشارهای با ارتفاع متوسط یا پایین بود. پیدایش این توربین امریکایی در لوول<sup>۲</sup> واقع در ماساچوست، بین سالهای ۱۸۴۹ تا ۱۸۵۵ اتفاق افتاد. لوول، مرکز مهم صنعت بافندگی در امریکا بود.

آقای فرانسیس، که مهندس شرکت Locks and Canal Co بود که از این سیستم توزیع انرژی آبی در لوول استفاده می کرد در سال ۱۸۴۴ دستور ساخت توربینی از نوع فورنرون را دریافت داشت که شکل پره‌ها، دریچه‌ها و توزیع کننده آن به توسط مهندس دیگری به نام آقای یورایه اترن بویدن<sup>۳</sup> که به آن شرکت تعلق نداشت از نو محاسبه و نقشه کشی شده بود. ساخت این وسیله در آن زمان بسیار دشوار بود و شمار کمی از هیدرولیک دانان می توانستند آن را بسازند. به طور کلی این سازندگان، در انتخاب شکل، به تجربه عمل می کردند. کارگاههای بسیاری در آن زمان توربینهای واکنشی با مدل‌های گوناگونی، برحسب وسایلی که داشتند، تولید می کردند.

بررسیهای نظری بویدن سبب شد که فرانسیس برای اینکه بهترین راه حل را برای پاسخ به نیازهای کارگاههای لوول و نحوه جریانهای آب که در آن زمان به تعداد زیادی چرخهای کلاسیک پهلوریز مجهز بودند بیابد به مراجعه به مشکل عمومی توربینها روی آورد. همکاری این دو مهندس به آنها امکان داد که طی چند سال روشی برای مطالعه طرحها عرضه کنند و یک نوع توربین را که در جهان به نام فرانسیس شهرت یافت بسازند. جریان آب در اینجا نیز مانند مورد هاود، مرکزگرای بود. یک مخزن بزرگ آب در بالای ظرف، آب را به اطراف توزیع کننده هدایت می کرد (شکل ۸۳). در کارگاه لوول هم نخستین مدلها با دقت بسیار زیاد، هم در محاسبات و رسم نقشه‌ها، هم در ساخت پرگان و تجهیزات گوناگون اجرا شدند. پیشرفته بودن صنعت امریکا به سود ساخت توربینهایی تمام

1. Zebulon Parker 2. Lowell

۳. Uriah Atherton Boyden (۱۸۰۴ - ۱۸۷۹): مخترع امریکایی.



شکل ۸۳. توربین آبی امریکایی، نوع فرانسیس.

ساخت آن در اواخر سده ۱۹ است. نمای باز شده آن: روتور در قسمت پایینی دیده می شود و توزیع کننده، در شکل بالا.

شد که پس از مدتی اندک بر پایه اصولی که هاود، بویدن و فرانسیس گذارده بودند، رواج یافتند. انواع فراوانی از مدلها در سالهای ۱۸۶۰ - ۱۸۸۰ به بازار آمدند. معمولاً وسایل تجربی به کار گرفته می شدند. برای پرهیز از ناخشنودی مشتریان از طرز کار توربینها، این صنعت نوین ناگزیر روشهای خود را تصحیح، و مراکزی برای آزمایشهای فنی و کنترل تأسیس کرد.

سرانجام حدود سال ۱۸۸۰، این مدل که در جهان با نام توربین امریکایی شناخته شده و رواج می یافت طرح مرکزگرای جریان آب را با نوعی تغذیه از طریق سرپوش حلزونی ترکیب کرده بود، این کار سبب شد که آب در داخل (روتور)، دارای جریان محوری باشد. همین مدل است که با اشکال گوناگون خود توانست، در اواخر سده پیش، زمانی که ساخت تجهیزات هیدروالکتریک شروع شده بود، توربینهای فرانسوی را از دور بیرون کند.

توربین پلتون: در همین اوان نوع دیگری توربین برای کاربرد در رگه های معدنهای طلای کالیفرنیا ساخته شد. این توربین از چرخاب ملاقه دار اقتباس شده بود که در تعدادی از مناطق دارای

جریانهای سیلابی طی سده‌هایی به‌کار برده می‌شد. آن را با نامهای گوناگونی می‌خواندند: چرخ عرب، چرخ اهالی پیرنه، چرخ پیر (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۴۹). این دستگاه، یک چرخ ضربه‌ای بود. جهشی از آب به ملاقه‌های چوبی که معمولاً همچون قاشقهای کشیده شده به شکل V بودند، ضربه می‌زد تا به بهترین شکلی، در بخش کوچکی از مسیر بالارونده خود، آب خود را خالی کنند. این چرخ قاشقی، تحولی از وسیله خشنتری بود که از پره‌های مسطح و دارای میل مناسب تشکیل می‌شد و هنوز در تأسیسات کوچک روستایی تقریباً فعال است. ما در اینجا با نمونه‌ای از یک تکنیک سنتی روبه‌رو هستیم که یکباره و با شدت به یک موضوع تکنیکی تبدیل می‌شود که طی چند دهه، در دورانی که زمینه تکنیکی - اقتصادی آن موجود است به تکامل خود دست می‌یابد.

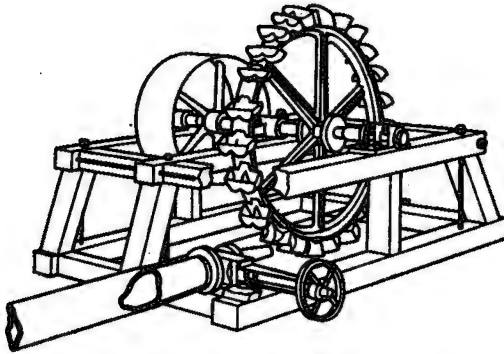
استخراج طلای کالیفرنیا مستلزم روشهای قوی هیدرولیکی بود: استخراج خاکها و شست‌وشوی ماسه‌ها با جریانهای شدید آب. چندی نگذشت که شبکه کاملی از بندهای آبی ساخته شد و تجهیزات نهرکشی در مناطق کوهستانی و هدایت آنها به‌سوی مکانهای طلادار برقرار گردید.

از سال ۱۸۵۰ این شبکه‌ها به چرخهای ضربه‌ای برای بازیابی انرژی مکانیکی مورد نیاز کارگاهها مجهز شدند. تکنیک سنتی ساخت از چوب، که سریع و اقتصادی بود، بی‌درنگ پذیرفته شد. پس از یک دوره ساختهای ابتدایی دیده شد که بعضی از سازندگان که در ساخت این وسیله، خبره شده بودند برای بالا بردن بازده آن کوشیدند. این کاوشهای تجربی در طرز تخته‌بندی، اصلاح شکل چرخها و پرگان و بالاخره روی شیپوره‌ها تمرکز یافت. حدود سال ۱۸۷۰ در ساخت پرگان و شیپوره‌ها، سپس چرخها و کارتر آنها به‌جای چوب از فلز استفاده شد. سازندگانی که به بهترین نتایج دست یافتند، از میان همه همکاران، آقای لسترالن پلتون بود که پرگان دلواره لوله شیپوره طرح ویژه وی، بازده را از ۴۰ به ۸۰٪ بالا بردند (شکل‌های ۸۴ و ۸۵).

توربین پلتون از آغاز سده بیستم برای تجهیزات هیدروالکتریک در دسترس بود و به‌کار گرفته می‌شد و سرانجام در برهه ۱۹۱۰ - ۱۹۳۰ برای استفاده در آبشارهای مرتفع، همه مدل‌های دیگر توربین را از میدان بیرون راند.

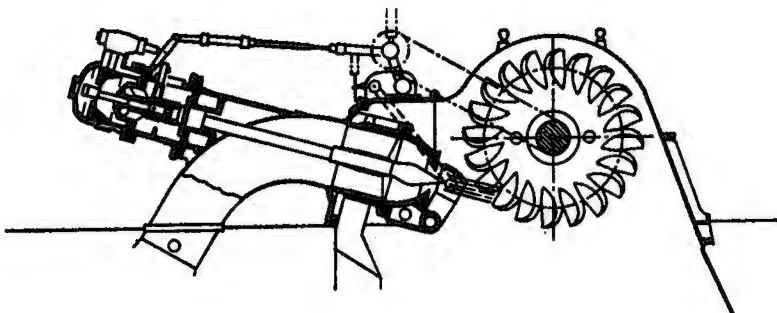
توربین پره‌ای کاپلان: در همان دوران توربینهای امریکایی اقتباس از توربین فرانسوی با رقیب تازه‌ای، که آخرین هم بود، روبه‌رو شدند نوعی توربین که آبشارهای کوتاه روی خانه‌ها و نهرهای دارای جریان آرام، کاملاً مناسب بود. این توربین پره‌ای را یک مهندس چک به نام ویکتور کاپلان در ۱۹۱۲ مورد مطالعه قرار داده بود. پس از اینکه جنگ جهانی در کارهایش وقفه پدید آورد، وی در





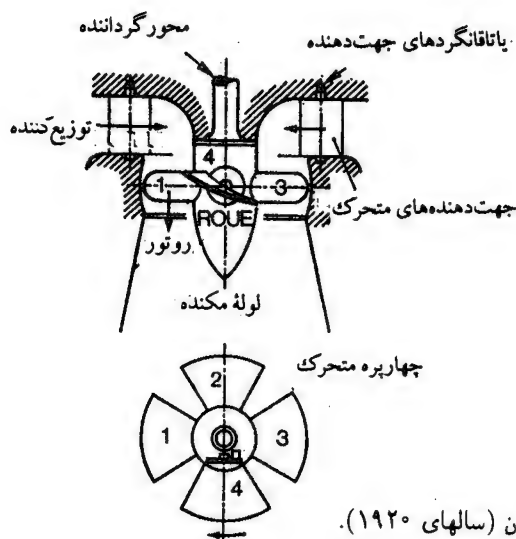
شکل ۸۴. مدل توربین پلتون (حدود ۱۸۹۰).

سال ۱۹۲۰ کار را ادامه داد و نخستین توربینهای او در ۱۹۲۴ ساخته شدند. روتور توربین آقای کاپلان از پره‌های حلزونی تشکیل می‌شد که جهت پره‌ها را می‌شد تغییر داد. این کار به کمک مکانیسمی انجام می‌گرفت که در پیچ اصلی پروانه آن قرار داشت و برحسب سرعت گردش آن قرار داشت و برحسب سرعت گردش آن در مراحل مختلف کار: راه افتادن، شتاب یافتن، کار عادی و سرانجام کاهش دور آن جهت پره‌ها عوض می‌شد (شکل ۸۶). آب با واسطهٔ بخش توزیع‌کننده وارد توربین می‌شد، درحالی‌که جهتگیری پره‌ها نیز تغییرپذیر بودند. این نظریه متکی به اطلاعاتی دربارهٔ توربینها و پدیده‌های جریان سیالات در اشکالی از سطوح بود که



شکل ۸۵. مدل تکامل یافته توربین پلتون (حدود ۱۹۳۰).

توجه کنید به: فرمان خودکار سوزندار، که توان جهش آب را در لولهٔ شیپوره تنظیم می‌کند.



شکل ۸۶. توربین پروانه دار کاپلان (سالهای ۱۹۲۰).  
نمای عمودی و افقی: چرخ پروانه دار با پره های متحرك.

در آن زمان برای ساخت وسایل فضا نوردی بررسی می شدند.

توربینهای فرانسیس که در زیر آبشارهای مرتفع و نیز مجراهای تحت فشار، از توربینهای آن زمان پلوتون تندتر می گردیدند، در زیر آبشارهای کم ارتفاع، گردش کندی داشتند. اما این توربین جدید واکنشی کاپلان، در شرایط اخیر کاربرد، به دو یا سه برابر گردش سریعتر دست یافت. نخستین کارخانه هایی که در کنار رودخانه های بزرگی مانند «راین» تأسیس شدند مجهز به چهار توربین امریکایی بودند تا ۳۰۰۰ اسب تولید کنند. چند سال بعد، حدود ۱۹۳۰ کارخانه هایی از همین ردیف با بیش از یک توربین کاپلان تجهیز می شدند و پنج تا ده هزار اسب تولید می کردند. پس از مدت بسیار کوتاهی، قطعات دیگر توربین کاپلان و نیز پلوتون را برای دستیابی به توانهای بیش از پیش بالا اصلاح کردند. از جمله آنها پذیرفتن لولة سوزندار شیپوره روی توربینهای اخیر بود که سبب می شد یک جهش استوانه ای به دست آید و پرگان دلواره ای که بهتر حساب شده بود به آن انطباق داده شد. این اصلاحات امکان دادند که قدرت هر واحد، طی سالهای ۲۰ دو برابر شود. مسائل دیگری در این دوره، پیش آمدند و این زمانی بود که انواع کاربرد انرژی هیدرولیک بسیار زیاد شده بود. در اینجا هم مانند مورد توربینهای بخاری، گروههای توربوژنراتور ساخته شد که

آلترناتورها در آن، مستقیماً روی محور توربین که افقی یا عمودی گذاشته می‌شد نصب می‌شدند. می‌بایست سرعت گردش توربین، با وجود تغییرات بار برقی، ثابت بماند و زمانی که چندین گروه مولد بین خود کوپل می‌شوند، کار تنظیم چهره دیگری خواهد داشت. رگولاتور کلاسیک گلوله‌ای وات بکلی کنار گذاشته شد و فرمان به شیرآلات که مقدار بده جریان آب را تنظیم می‌کرد، با سروموتورهایی انجام گرفت. سیستمهای مرتبط سازی به یکدیگر به کمک تکنسین‌ها پیوسته کاملتر می‌شد تا تقویت و توزیع بار برقی، نه تنها چند گروه از یک کارخانه بلکه گروههای چندین کارخانه و گاهی حتی چند کارخانه متفاوت برای تولید یک جریان متناوب با فشار ثابت، علی‌رغم تقاضای شبکه، با یکدیگر مرتبط شوند.

انرژی هیدرولیک: از سده‌های پیش از پیدایش برق، برای نگاهداری آب، در دره‌های عمیق یا در دشتهای سد می‌بستند. این سدها همیشه کم‌اهمیت هم نبوده‌اند، مثل سدهایی که برای جریان آب گرداننده آسیاهای سنتی به کار گرفته می‌شدند. نیاز به تولید برق بوسیله انرژی جریان آب سبب شد که تکنیکهای ساخت سدها از بن تغییر کنند.

در واقع اهمیت آبشارها به عنوان منبع یک انرژی جدید، از همان زمان به کار افتادن نخستین توربینهای فورنزون آشکار شد. در تمام مدتی که انتقال انرژی از طریق وسایل مکانیکی انجام می‌گرفت. این تأسیسات محلی بودند. منبعی از آب با ریزش آب خود، توربینی را می‌گردانید. آقای فورنزون در سال ۱۸۳۷ آبشارهایی با اختلاف سطح ۱۰۰ متر را با توربین مجهز کرد. در فرانسه، در نیمه دوم سده نوزدهم، آقای آریستید برژس کاربرد عاقلانه چیزی شد که وی آن را برای نخستین بار زغال سفید نامید. آقای برژس بود که مفهوم تجهیز یک سیستم کامل هیدرولیک را با منحرف کردن آبهای موجود، با ساختن مخازن آب، با بالا بردن جبهه یک مخزن طبیعی و با سوراخ کردن کف دریاچه با ایجاد یک تونل برای استفاده حداکثر از آب ذخیره شده، با هدایت آب بوسیله مجراهایی به سوی توربینها، مشخص ساخت.

آقای برژس که در حوالی لانس<sup>۱</sup> در ایالت ایزر، برای راه انداختن آسیاهای کاغذسازی یک سیستم هیدرولیک را مجهز ساخت، نوعی توربین افقی کنشی (ضربه‌ای) را طرح کرد که روتور آن یک دیسک چدنی بزرگ بود که طوقه حامل کاسه‌ها آن را احاطه کرده بود. این نخستین باری بود که آب در چندین کارخانه در عمقهای مختلفی از دره مورد استفاده‌های مکرر قرار می‌گرفت.

عمل تبلیغی مهیج وی مدت بیست سال ۱۸۶۹ - ۱۸۸۹ دنبال شد و در پایان چند دردرس قضایی در انتظار وی بودند زیرا، آیین‌نامه تنظیم استفاده از جریان آب را مراعات نکرده بود. وی

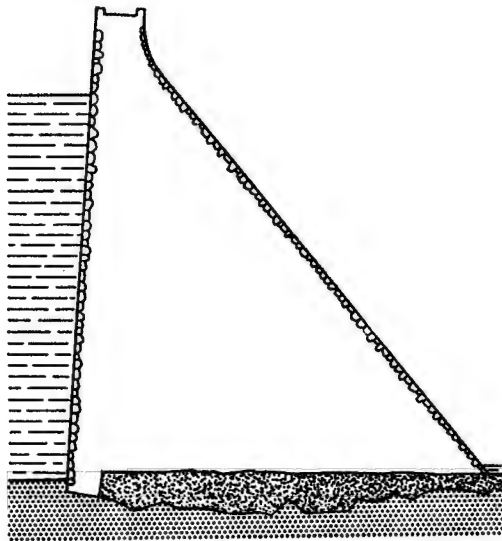
گرچه هیچ وسیله فنی تازه‌ای مطرح نکرده بود در بعضی از نشریات، اصطلاح زغال سفید را وارد کرد، که در سالهای ۱۹۲۰ به نیروی کارآمدی اشاره داشت که برنامه آن در دست تدوین بود. ساخت تجهیزات هیدروالکتریک در سالهای ۱۸۹۰ و ۱۹۰۰ آغاز شد و در شروع کار، سرمایه‌گذاری بسیار اندکی بدان تخصیص یافت. تنها بدین دلخوش کرده بودند که مخازن متناسب با توان موجود در محل کمترین آب رودخانه را بسازند. از آنجا که جریان آبهای کوهستانی مطرح بود که مقدار آن بین ماههای ذوب شدن برف و ماههای دیگر، بسیار تفاوت می‌کرد، اضافه توان موجود در این چهار ماه بین کارخانه‌های الکتروشیمی یا الکترومتالورژی فصلی توزیع می‌شد؛ این کارخانه‌ها در بقیه سال تعطیل بودند.

از آنجا که توانهای رسمی بسیاری از کارخانه‌ها، به دلایل اقتصادی، از توان در دسترس در محل کمترین آب رودخانه کمتر بود برای تأمین حداکثر برق در زمان لازم، از نیروگاههای حرارتی کمک می‌گرفتند. در همین دوران است که این نظر پیدا شد که مراکز هیدرولیک، قاعده نمودار تولید برق را تأمین می‌کنند، نظری که در فرانسه چندین دهه جان سختی کرد و تا سالهای ۲۰ محترم شمرده می‌شد. در کشورهای دیگری که از سیستم هیدروگرافی خوبی برخوردار بودند، مثلاً در اروپا، سوئیس، سوئد و نروژ، تولید برق آبی بسرعت توسعه یافت و تا حال هم پاسخگوی همه نیازهاست. و نیز تعدادی از آنها، مثلاً دو کشور آخر، ناچار بودند که از نیروگاه حرارتی نیز کمک بگیرند، که علت آن شرایط جغرافیایی است که مناطق بسیار شهری شده را بیرون از قلمرو برق آبی گذارده‌اند. پس از جنگ جهانی دوم، زمانی که مشکلات حمل و نقل به مسافتهای دور برطرف شد، توانستند به اصطلاح کل نیازها را با برق آبی تأمین کنند و برق را به خارج از کشور نیز صادر کنند.

در امریکا، تولید ممالک متحده نیز به دو بخش تقسیم شده بود. منابع عظیم آبی، تنها در سالهای ۱۹۳۰ اهمیت یافتند. تولید برق حرارتی همواره در سطح پایینی بوده است. از کوششهای وسیعی که روسیه شوروی، از نخستین نقشه پنج‌ساله، از خود نشان داده است یاد شد. این نتایج بیشتر در سایه پیشرفت تجهیزات هیدروالکتریکی به دست آمد.

سدها: بی‌شبهه باید پذیرفت که نیازهای مربوط به تولید برق جدید، در سالهای ۲۰، تکنیک سدسازی را تغییر داد. طرحهای بزرگ سدسازی در کوهستان و دشت در همه کشورها آغاز و طی دو دهه میان دو جنگ جهانی به اجرا درآمدند.

نخست برای برقراری مخازن بزرگ آب، تنها با یک نوع سد آشنا بودند، سد وزنی، که منشور عظیمی از مصالح ساختمانی بود که در برابر فشار آب می‌ایستاد. نخستین سدی که شکل آن از نظر

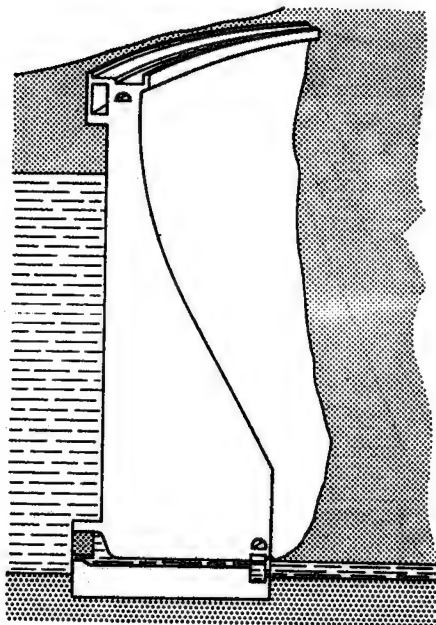


شکل ۸۷. سد وزنی.

ریاضی بررسی شد، سدی بود که در سالهای ۱۸۶۱ - ۱۸۶۶ برای آبرسانی به شهر سنت - اتین، در فوران ساخته شد. بر پایه نظریه تازه‌ای در آن زمان: *Solide d'égale résistance* <sup>۱</sup> (دیوار با مقاومت برابر)، توانستند عرض قاعده‌ای را که استحکام کافی به سد می‌دهد و راهروی باریک بالای سد و نیز جبهه‌های منحنی پیش و پس متناسب با آن را حساب کنند. اصلاحات پیاپی در سدسازی در حوالی سال ۱۹۰۰ منجر به ساخت نوعی سد وزنی شد که در سراسر جهان آن را سد فرانسوی نامیدند و در سال ۱۹۲۳ به سد مثلثی انجامید (شکل ۸۷). خصوصیت‌های پایداری قوسها، که از هزاران سال پیش برای ساختمان شناخته شده بودند از همان اوایل در ساختمان سدها مورد استفاده قرار گرفت. فشار آب بر کناره‌ها گزارش شده‌است. یکی از کهنترین بناهای از این نوع، سد زولا<sup>۲</sup> بود که در سال ۱۸۴۳ نزدیک اکس - آن - پرووانس<sup>۳</sup> ساخته شد.

تعویض مصالح ساختمانی بابتون، نخست در ممالک متحده آمریکا، سبب زیاد شدن سدهای قوسی شد که با بستن دره‌های تنگ بخوبی سازگار بود. سدسازان آمریکا در برپا کردن این نوع سدها بزودی استاد شدند و بعدها از این تکنیک برای بستن دره‌های نسبتاً عریض استفاده کردند

۱. شکلی که فشار وارد بر آن، در همه نقاط به‌طور برابر تحمل می‌شود. - م.

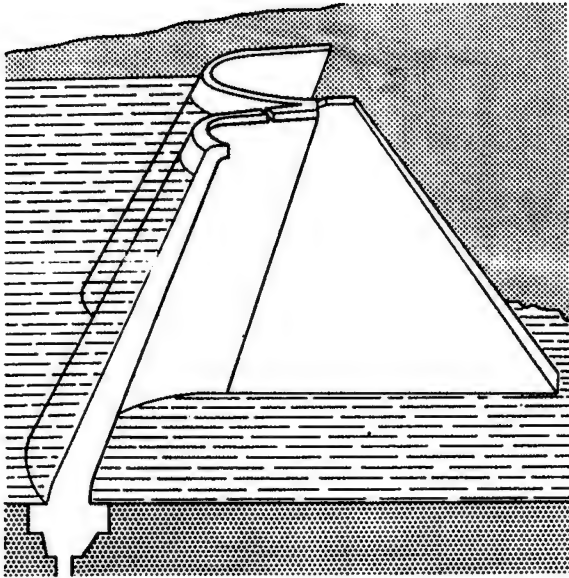


شکل ۸۸. سد قوسی.

(شکل ۸۸). ساخت سدهای قوسی پس از مرحله آزمایشی، در سال ۱۹۲۰ در فرانسه برای تأسیسات هیدروالکتریک در کوهستان پذیرفته شد. در این نوع سدها از توده عظیم مصالح که در ساخت سدهای وزنی لازم است، پرهیز می‌شود.

وانگهی، این کار در دوره نخست نوآوری، با چند اقدام در جهت سبک کردن سد بود که در آن زمان گفت‌وگوی فراوان به دنبال داشت. با این همه، عمل تخلیه و پشت‌بندیها، زمانی که وسایل سدسازی مطمئنتر شدند فواید خود را آشکار ساختند. (شکل ۸۹). در فرانسه، بهترین دستاورد این روش، سد روزلان<sup>۱</sup> است که در سال ۱۹۶۱ به پایان رسید.

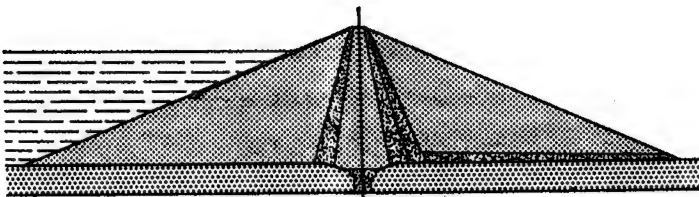
پس از اندک مدتی، کار سدسازی در اثر زیاد شدن شکلهای آن و در سایه کاربرد بتون مسلح، بسیار انعطافپذیر شد. قوسها و پشت‌بندیهای متعدد، راه‌حل ساخت سدها در هر نقطه مورد نظر شدند. بحث و گفت‌وگو درباره سدسازی در سالهای ۵۰ همین سده تا آنجا پیش رفت که ادعا شد که کاربرد قوسهای باریک، که صرفه‌جویی در مصالح است، چنانچه شکل قوس بدقت محاسبه



شکل ۸۹. سد دارای چندین قوس و پشت بند.

شود، خطری ندارد.

پیشرفتهای سدسازی با بتون موجب رها کردن بعضی تکنیکهای سنتی هم نشد. سدهای سنگی زیرآبی، که از تکنیک ساخت بندهای دریایی اقتباس شده بودند و نیز سدهای خاکی (شکل ۹۰)، که مثل سدهای پیش، یک نقاب مرکزی نفوذناپذیر از خاک رس متراکم، که حتی درپها هم وارد می شد، داشتند. هر بار که ضرورتهای اقتصادی ایجاب می کرد - جای خود را به



شکل ۹۰. بند خاکی با نقاب مرکزی نفوذناپذیر.

سدهای وزنی، برای بستن مخازن بزرگ آب یا آبشارهای کوتاه، می داد. نخستین بند بزرگ خاکی، در سال ۱۹۱۲ در پاناما ساخته شد. این تکنیک در سالهای ۳۰ برای تنظیم و استفاده از جریانهای وسیع آب تکمیل شد. از جمله سدهای بزرگ ساخته شده در این دوره می توان از سد هوور روی رودخانه کلرادو و نیز رشته سدهای مشهور دره تنسی نام برد. پس از این کارها، سدهای بزرگ دیگری از این نوع ساخته شدند، از قبیل سد سر-پونسون<sup>۱</sup> در فرانسه که در سال ۱۹۶۱ به پایان رسید و نیز سد آسوان در مصر، در سالهای ۱۹۶۰-۱۹۷۱.

پس از اندک مدتی، در سال ۱۹۳۰، نارسایی مخازن آب برخی سدها را در فصول خشک و در ساعتیهای بیشترین مصرف، با اتصال چندین مخزن واقع در ارتفاعات مختلف و نیز با تلمبه زنی، در ساعتیهای کمترین مصرف، مخزن پایینی در مخزن بالایی جبران می کردند. شبکه های واقعی آبرسانی در سالهای ۵۰ در مناطقی، به شکل بالا مصنوعاً ایجاد شد.

تأسیسات فنی ضمیمه: تکامل شکل سدها و نیز مصالح ساختمانی آنها تنها عواملی نیستند که انگیزه پیشرفت این تکنیکها در ۵۰ سال اخیر بودند. تأسیسات فنی ضمیمه برای استفاده بهینه و خزینه شدن کافی آب در سد، چه بتونی و چه خاکی، اهمیت بسیار دارند. بتدریج که سدسازی عملی جسورانه تر و پرشکوه تر می شد و مفهوم کارخانه ها تغییر می یافت، مشکلات مربوط به دریچه ها، انشعاب آب، کارهای مربوط به تخلیه و وسایل خارج کردن آب اضافی، هریک به نوعی باید اصلاح می شدند. بدین ترتیب، با مجموعه پیچیده ای سروکار داشتند و کل واحدی از علم و عمل جدید تشکیل شد که در مدت پیاده کردن برنامه های تأسیسات هیدروالکتریکی که در برهه بین دو جنگ جهانی شروع شد تقریباً در همه جا در پایان سالهای ۶۰ به اتمام رسید، کمال یافت. وسایل تحقیقاتی تازه ای برای این نیازمندیها باید اختراع می شد. کار تحقیق در هیدرولیک طی سالهای ۲۰ و ۳۰ حالت تجربی گرفته بود و آزمایشگاههای ویژه، این کار را روی مدل های کوچک شده، مثلاً نیمرخهای مجرای ریزش آب اضافی سد یا کانالها تخلیه انجام می دادند. رشته زمین شناسی نه تنها در این تحقیقات شرکت داشت، بلکه کار بررسی مناطق، ساختار آنها و خراب شدن احتمالی و نیز ترمیم آنها را عهده دار شد. اهمیت مهار کردن در حقیقت بسیار زود به عنوان یکی از شرایط اساسی پایداری سد، آشکار گردید. تکنیکهای بررسی خاکها را نیز از رشته های دیگر به یاری خواندند و به طور وسیعی مورد استفاده قرار دادند. آقای ا. کواین<sup>۲</sup> یکی از پرآوازه ترین و بهترین کارشناسان این رشته، در سال ۱۹۳۰ توانست بنویسد: «وسایل شناخت به طور فوق العاده ای پیشرفت و تکامل یافته اند: گمانه زنیهای مته ای، الماسی، ساچمه ای، چکشهای بادی که برای تجربه



و پیشرفتهای به دست آمده در کارهای معدنها مؤثر بوده اند به چنان درجهای از قدرت و تکامل رسیده اند که هیچ زمینی نیست که آن را نتوان کاوید، تحت آزمایش بازآویی قرار نداد و حتی همه جهات آن را ندید ... کار تزریق سیمان پیشرفتهای جالبی ایجاد کرد. اکنون می توانند شکافهای موجود در زیرزمین، تا عمق چندین صد متر را پر کنند و زمینهای آهکی رسی و ماسه سنگی سست را که، تاب فشار یا رخنه کردن آب را ندارند محکم سازند؛ بندهای خاکی را با موفقیت تزریق کنند و تراوشهای سد را که در هر ثانیه چندین مترمکعب آب را هدر می دهند کور سازند.

بدین ترتیب، می توان بتونهای ترک یا حفره دار را احیا کرد؛ آبرفتها را با تزریق بتون محکم و رخنه ناپذیر و دارای بهترین کیفیت ساخت.»

از آنچه گفته شد می توان از وسعتی که تکنیکهای جانبی و لازم برای ساختن تأسیسات هیدروالکتریک رفته رفته به دست آورده بود تصویری داشت.

اکثریت سدهای بزرگ جهت تأمین تغذیه کارخانه های هیدروالکتریک ساخته شدند. اما شمار زیادی از آنها فرصت یافتند که آبیاری مناطق بزرگی را تأمین کنند و سبب غنای کشاورزی باشند. بدین ترتیب، نخستین هدف اولیه، بهره گیری از انرژی هیدرولیک، آیا در بخشهای متعددی، پشت سر گذاشته نشده بود؟ دیده می شود که تولید برق، نقطه مرکزی دایره گسترده ای از پیشرفت شده است که تکنیکهای بسیار زیادی بدان وابسته اند.

نخستین کارخانه ها: باید به تنوع اشکال سدها، گوناگونی خود کارخانه های برق را نیز افزود. در نخستین تأسیسات انرژی هیدرولیک، توربین از طریق چرخنده ها و تسمه هایی دستگاهها را می گردانید.

بنابراین توربین باید فاصله چندانی با ماشینها نداشته باشد. لاجرم، کارخانه های هیدرو دینامیکی باید در دامنه مخازن آب و گاهی دور از آن، در محل مناسب برای ساختن بناها با وسایل در دست رس برای تعمیرات ماشینها و مواد خام و فراورده های ساخته شده تأسیس شوند. تغذیه توربین با لوله های دارای آب تحت فشار پایین رونده، به طول چندین صد متر از مخزن انجام می گیرد. این نوع تأسیسات بود که در دوران اول برای بهره گیری از آبشارهای مرتفع یا متوسط به کار گرفته شدند. اما تغذیه گروههای توربو-آلترناتورهای بیش از پیش نیرومند، مستلزم ساخت لوله های با قطر بزرگ بود تا ورودی آب زیاد را تأمین و فشارهای بالا را تحمل کنند. لوله هایی که تا آن زمان هیچ صنعت دیگری آن را تقاضا نکرده بود. در آن زمان دیده شد که در سالهای ۱۹۱۰ و بویژه ۱۹۲۰ صنعت تازه ای برای ساخت لوله های مناسب هیدروالکتریک به وجود آمد.

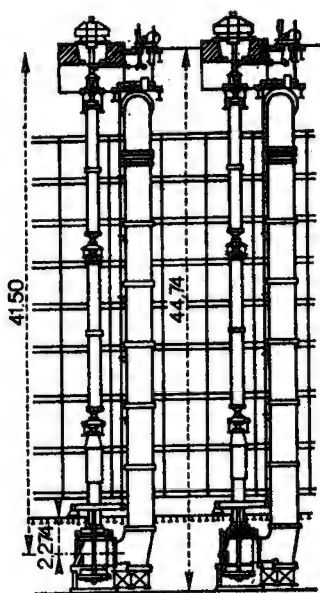
این لوله‌ها از فولاد، برای پایداری در برابر فشار زیاد، ساخته شدند و گزینش مصالح، تکنیکی را اقتضا می‌کرد که در آن روزگار بسیار پیشرفته بود: تکنیک ساخت دیگهای بخار. بعدها جهت فشارهای متوسط و پایین و نیز قطرهای بالا از بتون مسلح استفاده شد.

نخستین ساخت شکوهمند، تأسیسات آبشار نیاگارا در ساحل رودخانه نیویورک بود. در سال ۱۸۸۹ یک شرکت مالی تشکیل شد که مهمترین بانکداران آن دوران: مورگان، وندربیلت، روچیلد از لندن و تعدادی شرکتها، مانند ادیسن و جنرال الکتریک در آن گرد آمده بودند. در این دوران مزایای انتقال انرژی از طریق جریان برق هنوز آشکار نشده بود و اتخاذ تصمیم برای استفاده از برق، تنها پس از مدتها بحث و گفت‌وگو عملی شد. این بحثها، انگیزه گفت‌وگوهای دیگری درباره نوع جریان مورد استفاده و سپس درباره چگونگی گرفتن انرژی آبی شد. ساحل رودخانه تحت پوشش قانون قرار گرفت و ناگزیر از حفر تونلی شدند که در بالا دست مخزن آب دولت، باز شود. سپس ناچار از انتقال جریان تا ۳۲ کیلومتر تا بوفالو شدند که در آن زمان ۱۵۰۰۰۰ سکنه داشت، باید گفت که ۵۰۰۰ نفر اهالی حوالی آبشار نیاگارا<sup>۱</sup>، جهت تنها استفاده از جریان مورد نظر، روشنایی، مشتریان کافی نبودند. این شرکت دست به کار یافتن کاربردهای دیگری در تمام منطقه، نه تنها در شهر بوفالو، شد بلکه از وجود تأسیسات شیمیایی و مکانیکی محل نیز استفاده کرد.

برای تحقیق جهت ساخت آلترناتورها از کارشناسان بسیار پرآوازه تقاضای کمک شد و سرانجام این آلترناتورها را وستینگهاوس براساس طرح جرج فوربز انگلیسی ساخت. کارخانه در سال ۱۸۹۶ انتقال برق به بوفالو را آغاز کرد و تجهیزات این کار تا ۱۸۹۹ به طول انجامید. موفقیت این مؤسسه برای نخستین بار، نمایشی از کارایی یک نیروگاه پرتوان بود که به منطقه وسیعی برق می‌رسانید.

این کارخانه دارای هشت گروه ۵۰۰۰ اسبی بود (شکل ۹۱). توربینها در عمق چاهی با ۴۰ متر ژرفا گذاشته شده بودند و لوله‌های عمودی آب وارد چاه می‌شد. آلترناتورها در موتورخانه گذاشته شده بودند که در سطح بالاتری قرار داشت. اتصال آنها به واسطه میله‌های عمودی انتقال با همان طول لوله‌ها انجام می‌گرفت.

این نوع تأسیسات، که به عنوان نمونه کارخانه جامع همراه با مخزن تلقی می‌شد لااقل در چند جا که خاکبرداری آسان بود تقلید شد: در انتهای کانال بالا دست رودخانه بخصوص در ساحل کانادایی آبشارهای نیاگارا در سال ۱۹۰۳، و در فرانسه برای کارخانه ونسا<sup>۲</sup> در منطقه پیرنه شرقی در سال ۱۹۰۲ آغاز به کار کرد، که تا سال ۱۹۷۲ ادامه داشت. اما در محل کارخانه ونسا، اختلاف سطح، تنها ۱۲ متر بود.



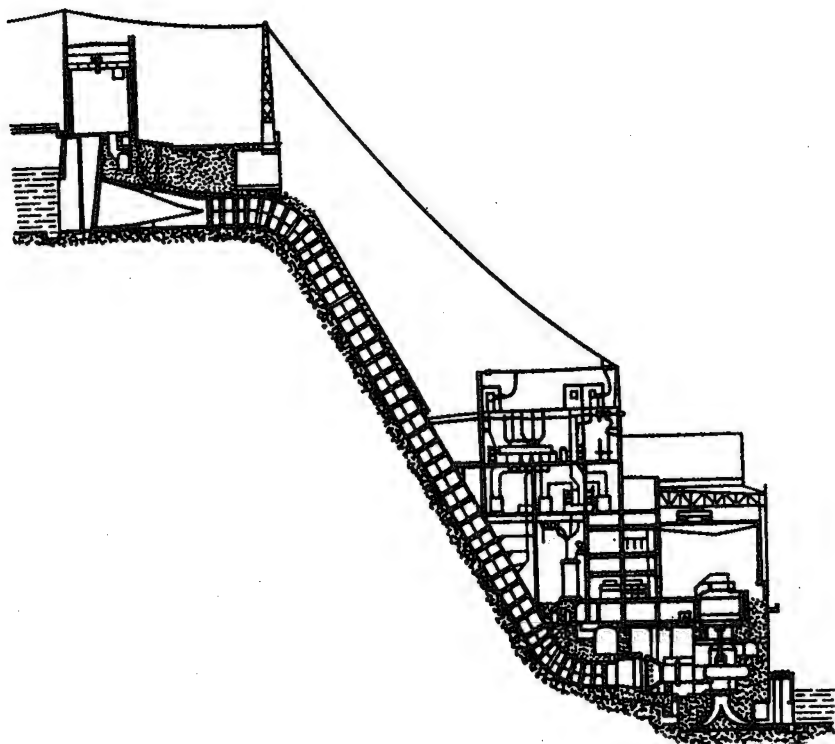
شکل ۹۱. دو گروه نیروگاه آبشار نیاگارا (۱۸۹۵).

در سال ۱۹۲۲، یعنی ۲۵ سال پس از نمونه ممالک متحده، کانادا در ساحل نیاگارا در کویستن<sup>۱</sup> یک کارخانه جدید هیدروالکتریک برپا کرد. کانادا در این کارخانه از متداولترین طرز کار موجود که کارخانه به آبگیر مخزن بوسیله یک لوله تحت فشار وصل می شد استفاده کرد، و گروههای توربوآلترناتور، محورهای بسیار سنجیده تری برای انتقال حرکت داشتند (شکل ۹۲).

کارخانه های آبشارهای مرتفع: در واقع، مراکزی که حدود نیم سده از تجهیزات آنها می گذشت، به تناسب پیاده کردن و گسترش برنامه ها، برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون به برق، به چنان گوناگونی روی آوردند، که انواع مختلفی از تأسیسات، بسرعت پدید آمدند. کارخانه های بزرگ آنها، در کمتر از ۲۰ سال ساخته شدند و بهره برداری را آغاز کردند. تفاوت آنها نه تنها به واسطه نوع سد، یعنی چیزی بود که شرایط جغرافیایی و آب شناسی آن را ناگزیر می ساخت، بلکه به علت محل کارخانه در پایین دست مخزن هم بود.

دیده می شود که در دوره کاملاً اول، ساختها در دامنه آبشارهای مرتفع انجام گرفته اند. کارخانه در فاصله کم و بیش زیادی از مخزن یا دهانه سد، یا در مورد کارخانه های بدون سد و مخزن آب

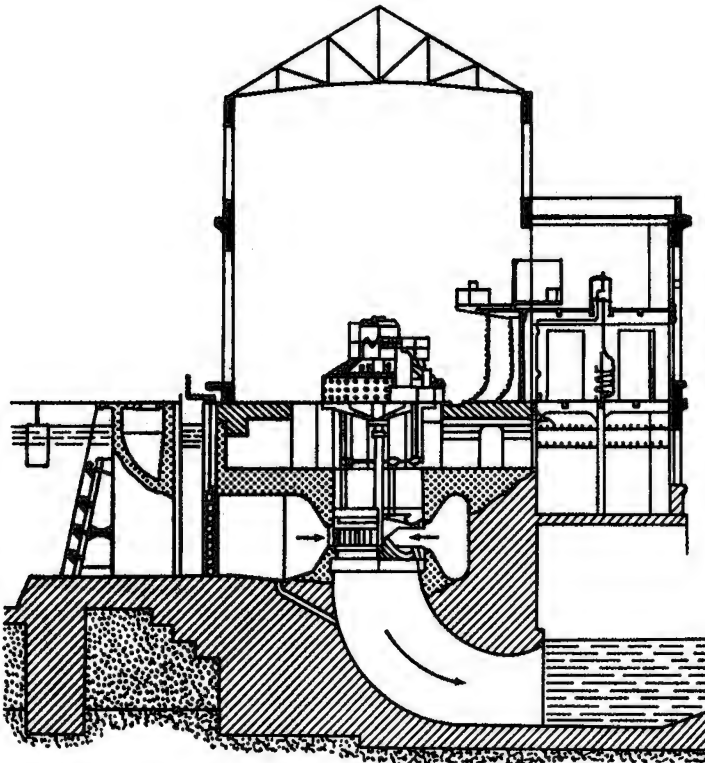
1. Queenston



شکل ۹۲. نیروگاه کونستن، در آبشار نیاگارا (۱۹۲۲) با لوله‌های تحت فشار.

دور از تأسیسات آبگیر قرار دارند. کاربرد لوله‌های با فشار آب، سرعت رواج گرفت اما برای پرهیز از هزینه‌های بسیار بالا، در مواردی که فاصله به چند کیلومتر می‌رسید، نهرهای نیروگاه با شیب کم در کنار دره حفر می‌شدند و آب، به سالن توزیع هدایت می‌شد که لوله‌های تحت فشار از آنجا طبق خط دارای بیشترین شیب به سوی کارخانه روانه می‌شدند. برای استفاده از حداکثر انرژی در دسترس یک مخزن، سرعت در طول دره، زنجیره‌ای از کارخانه‌های مرتبط با یکدیگر از طریق تأسیسات بالا دست نهر ساخته شدند. این نوع تأسیسات هنوز هم روی به پیشرفت دارد.

کارخانه‌های آبشارهای با ارتفاع کم و متوسط: برای بهره‌گیری از آبشارهای دارای ارتفاع متوسط، حدود چند ده متر، کوشیده‌اند تا نیروگاه سد و لوله‌های مربوط به آن را هر چه بیشتر به یکدیگر نزدیک



شکل ۹۳. نوع نیروگاه هیدروالکتریکی با ارتفاع کم آب (سالهای ۱۹۳۰).

کنند؛ و بهتر از همه اینکه بتون سد را لااقل در بخشی از کناره رودخانه ضخیم بگیرند (شکل ۹۳). در سالهای ۳۰ برای صرفه جویی در مصالح، بخشی از نیروگاه در دامنه سد قرار داده می شد؛ اما، ده سال بعد آن را تماماً در توده ای از بتون جای دادند. در چنین موقعیتی بود که مجراهای ریزش (آبهای اضافی) از نوع به اصطلاح پرش اسکی، ساخته شدند.

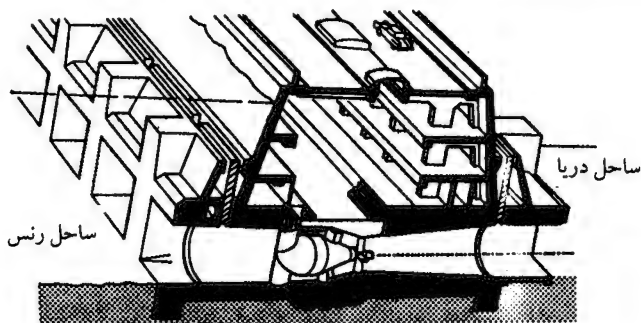
انواع دیگری نیروگاه نیز طی سالهای ۳۰، ویژه سدهای آبشارهای با ارتفاع کم، سد روی شطهای بزرگ با جریان آرام ساخته شدند. ساخت چنین سدهایی برای مقابله با شرایطی بود که در مناطق جغرافیایی دیگری وجود نداشتند: جلوگیری از تجاوز آب به دشتهای اطراف در هنگام طغیان رودخانه و مختل نشدن کشتیرانی در شط. برای دسترسی به هدف نخست، سدها را با

ردیفی از دریچه‌های بزرگ مجهز ساختند که آسان باز و بسته می‌شدند و از این یا آن سو به پایه‌های عمودی تکیه داشتند. دهانه سد، در بالا دست رودخانه، یک کانال عریض قابل کشتیرانی بود که در چندین کیلومتر دورتر به یک سد هیدرولیکی مجتمع می‌رسید که فاصله آزادی بین دیوار اکلوز و دیوار جانبی سد وجود داشت.

پیاده کردن برنامه‌های بزرگ اجراهای هیدرولیکی، جریانهای ضعیف آب و نیز آبشارهای کم ارتفاعی را که همیشه سدهای کوچک ویژه گرداندن آسیابهای قدیمی با تکیه بر آنها ساخته می‌شدند، ندیده نمی‌گرفت. پیدایش گروههای کپسولی در اوایل سالهای ۵۰، استفاده از این منابع سنتی انرژی را ممکن ساخت. گروه کپسولی، سدهای کوچکی هستند که هر کدام یک توربین کاپلان با محور افقی دارند که آلترناتوری را که در یک جعبه نفوذناپذیر است می‌گردانند. این جعبه در مجرای قرارداد که مقطع آن طوری است که واکنش آب را روی پره‌های توربین، با بهترین بازده تأمین می‌کند.

مشابه این تکنیک، اما در مقیاس بسیار بزرگتری، برای استفاده از انرژی کشندی به کار گرفته شد. در سدهای پیش (احتمالاً سده شانزدهم یا آغاز هفدهم) آسیابهای کوچکی روی جریان پایینی چند نهر، که تا حدودی تحت تأثیر جزرومد بودند وجود داشتند. دو حوضچه اکلوز موازی یکدیگر هر کدام دارای یک چرخ آسیاب بودند. مد دریا سطح آب یکی را بالا و دیگری را پایین می‌آورد، انرژی آن به‌طور پیوسته، لااقل از لحاظ نظری، بازیابی می‌شد. این تکنیک گروههای کپسولی امکان داد تا تنها کارخانه با نیروی محرکه کشندی، که هنوز در جهان یگانه است - یعنی کارخانه مصب شاخابه برتون<sup>۱</sup> از رودخانه رنس<sup>۲</sup> - در سال ۱۹۶۶ مورد بهره‌برداری قرار گیرد (شکل ۹۴). برای تأسیس این کارخانه، مصب رودخانه با دیواری به وسعت ۷۵۰ متر جبهه سد شد و مجراهایی ورود آب کشندی را از میان آن ممکن ساختند. این مجراها را با ۲۴ گروه سدهای کپسولی با طرح ویژه مجهز بودند تا به‌هنگام مد و هم در جزر دریا بتوانند عمل کنند. از سوی دیگر، برای اینکه نظمی در مقدار جریان آب در فصول مختلف سال وجود داشته باشد، آلترناتورها می‌توانند در ساعتهای کم‌آبی نقش موتور پمپ را در هر دو جهت داشته باشند. توان کلی این کارخانه ۲۴۰۰۰۰ کیلووات است.

در موقع ساخت این کارخانه با نیروی محرکه کشندی، طرح کارخانه دومی از همین نوع، اما بزرگتر بررسی شد. کارخانه دوم با تکیه بر جزایر کوچک شوزه<sup>۳</sup> می‌باید خلیج کوچک مون سن - میشل<sup>۴</sup> را مسدود کند، اما به‌طوری‌که بعدها خواهیم دید، سیاست تولید برق در فرانسه در آن زمان به



شکل ۹۴. گروه نیروگاه کپسولی با محور افقی، سد رنس.

انرژی هیدروالکتریک به دیده یک منبع کمکی می‌نگریست و پایه تولید روی نیروگاههای حرارتی قرار داشت و تأسیسات هیدرولیک مکمل آنها. این طرح رها شد. مراجعه دوباره به چنین کارهایی بی‌شبه بستگی به نتایج بهره‌برداری از انرژی هسته‌ای در دهه‌های پایانی سده بیستم دارد.

### شبکه‌های انتقال برق

تدوین یک سیاست تولیدی ...: پیشرفتهای حاصل در تولید برق، معلول افزایش نیازها بود. اما این نمودار که پیوسته رو به بالا دارد، تنها یک پیشرفت منظم تکنیکها و تجهیزات انتقال برق، آن را تأمین می‌کند.

زمانی که افزایش برق صنعتی در سالهای پس از جنگ جهانی اول شروع شد، گروه تکنسین‌ها، با تخصصهای گوناگون، که امکان این پیشرفت را به وجود آورده بودند، خود را در برابر انبوهی از دشواریهایی یافتند که تنها می‌توانست به‌طور جمعی در سایه یک تحول در طرز تفکر درباره نقش انواع گوناگون کارخانه‌ها در تدارک جریان، برطرف شود.

نخست، ما دیدیم که مشخصات جغرافیایی هر کشور، تأثیر قاطع در گزینش منبع انرژی دارد که تولید برق، همه یا بخشی از آن است. به عنوان نمونه می‌توان گفت که کشور سوئیس به‌طور کلی از انرژی هیدرولیک استفاده می‌کند، در حالی که بریتانیای کبیر از انرژی حرارتی؛ و کشورهای دیگر از میان این منابع بسیار گوناگون انتخاب می‌کنند.

وانگهی در داخل یک کشور هم، مناطقی از مدتها پیش خود را بسته به بهره‌گیری از انرژی هیدرولیک کرده‌اند و فلاتهای دور از کوهستان به انرژی حرارتی. این استدلال که اکنون به‌نظر

ساده‌لوحانه است واقعاً لااقل در دههٔ نخست سدهٔ ما، خود را به بیشتر کشورهای صنعتی تحمیل کرده بود. تنها در سالهای ۲۰ بود که نظرها روی به تغییر گذاشت. مورد فرانسه امکان می‌دهد بفهمیم که چگونه طی ۲۰ یا ۳۰ سال، سیاست عمومی تولید و انتقال برق، شکل گرفت و در هر کشور سرعت تکامل یافت و اینکه در اکثر این کشورها نسبت انرژی هیدرولیک به انرژی حرارتی واژگون شد.

دیده شد که مؤسسات هیدروالکتریک، لااقل در مناطق کوهستانی، زیربنای تولید برق بودند و رأس این تولید را نیروگاههای حرارتی - به اقتضای صنعت - داشتند. در گذر سالهای ۲۰ بود که معایب این سیستم هویدا شد. از یکسوی کارخانه‌های مصرف‌کنندهٔ برق، دیگر اجازهٔ کار کردن متناسب با فصل را به خود نمی‌دادند؛ از سوی دیگر نیروگاههای حرارتی نیز در شرایط بد اقتصادی بودند.

دیگهای بخار با فشار کم کار می‌کردند، سپس موتورهای متوقف شدند و در پایان دورهٔ بهره‌برداری، مراحل فعالیت سودآور نبود و تغییر مقدار تولید نیروگاههای حرارتی، بر حسب افزایشها یا کاهشهای مصرف، متضمن شرایط بد اقتصادی بود. آشکار شد که روش بهره‌برداری عاقلانه این است که نیروگاههای حرارتی بدون وقفه فعال باشند و منظمأ مقداری برق با ولتاژ ثابت تولید کنند. بنابراین، گرایش به توسعهٔ روابط متقابل میان نیروگاههای مختلف پدید آمد و از هیدرولیک تنها برای داشتن حداکثر انرژی در ساعتهای پرمصرف استفاده شد.

... و سیاست روابط متقابل: اما تحلیل انواع مؤسسات نشان داده بود که شبکه‌های نیروگاههای هیدرولیک، همهٔ این امکانات را عرضه نمی‌کند. نیروگاههای مربوط به جریانهای کوچک آبی، چه در دشت و چه در کوهستان در افزایش تولید به مقدار تقاضاهای شبکه‌ها ناتوان بودند و این کار تنها در توان نیروگاههایی بود که از مخازن عظیمی تغذیه می‌کردند زیرا در دورانهای کم آبی می‌توانستند تراز مخزن را پایین‌آورند بدون اینکه مخزن خشک شود. به این علت، نکات دیگری را هم باید افزود: فصلهای کم آبی در شبکه‌های مختلف هیدروگرافی، همزمان نبودند. به افزایش تقاضا نمی‌شد بی‌درنگ پاسخ داد مگر به کمک نیروگاههای هیدرولیک که تنها بوسیلهٔ لوله‌های تحت فشار، آب دریافت می‌کردند نه از طریق مجاری سرباز با شیب کم، که طی مسافتهای زیاد به محل تولید برق می‌رسیدند.

بنابراین، تولیدکنندگان برق در فرانسه از همان آغاز سالهای ۲۰ تصمیم گرفتند که روابط فی‌مابین نیروگاههای آبی، از هر نوع را عمومیت بخشند و بعدها هم همین تکنیک را در روابط متقابل



آبی - حرارتی توسعه دهند.

در فرانسه، مجتمعهای شهری پراهمیت و بویژه منطقه پاریس، هنوز از برد انتقال انرژی هیدروالکتریکی بیرون بود - محرومیتی که مناطق مهم صنعتی مانند حوضه های زغال سنگ و معادن شمالی و نیز معادن لورن از آن رنج می بردند. نیروگاههای حرارتی در آنجا با سهولت زیادی ایجاد شدند زیرا زغال سنگ یا گازهای کوره های بلند در محل در دسترس بود؛ و نیز زغال سنگ را از راه آبی آسان می شد تأمین کرد.

کوششی که در فاصله میان دو جنگ برای تجهیز صورت گرفت - و هنوز هم ادامه دارد - تنها در زمینه دو منبع انرژی است که در آن زمان شناخته شده بودند. در پایان جنگ جهانی دوم، تولید نیروگاههای حرارتی توانست خود را به مقدار تولید برق آبی برساند. تعادل، که تا حدودی مربوط به اجرای برنامه های بزرگ تأسیسات برق آبی رون، راین، روزلان، سرپونسون، کارخانه رنس و غیره بود تا سال ۱۹۶۵ حفظ شد. از این تاریخ نیروگاه حرارتی بسرعت بر نیروگاه هیدرولیک پیشی گرفت و ده سال بعد، برق آبی تنها یک سوم تولید برق فرانسه را تشکیل می داد. همان طور که ذکر شد، سرمایه گذاریهای بیش از پیش گزاف، بتدریج به مکانهای دشوارتری برای تأسیسات علاقه مند می شدند، ارزان بودن بهای نفت در سالهای ۶۰، سوختی که در نیروگاههای حرارتی به مقدار زیاد جانشین سوختهای دیگر شده بود، باعث شد که با در نظر داشتن این نکته که نیروگاههای آبی در هر صورت نمی توانند پاسخگوی همه مصرف روزافزون برق باشند، ساخت تعدادی تأسیسات بررسی شده، منتفی گردد. «بحران نفتی» سال ۱۹۷۲، در دورانی که بهره برداری صنعتی از انرژی هسته ای، طی مدت معقولی توانسته بود پشتیبانهای برای تأسیسات حرارتی باشد، برای تغییر نسبت انرژی حرارتی به آبی کافی نبود.

از توزیع تا انتقال: فاصله زمانی ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۰ نیروگاههای موجود، برق را تنها در بخش محدودی توزیع می کردند، پس از این مدت، دوره ای طولانی پیش آمد که می توان آن را به مراحل چندی تقسیم کرد و طی آنها، نخست شبکه های منطقه ای تکامل یافتند، سپس بین شبکه ها روابطی ایجاد کردند و سرانجام شبکه سراسری انتقال برق برقرار شد و در همان حال خطوط اتصال با شبکه های کشورهای همسایه ای ایجاد شدند.

نخستین مرحله، دهه ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ را می پوشاند. در این دهه، سازمانهای منطقه ای بین شرکت های تولیدی به هدف تأمین بهره برداری بسیار خوب نیروگاهها، با تقسیم توزیع میان خود برحسب ساعتهای کم و پرمصرف، تشکیل شدند. وانگهی، آنان بدین ترتیب کمکهای سریع به بخشهای

حادثه دیده را ممکن ساختند. عملی که شرکت راه‌آهن میدی همراه با گروهی از تولیدکنندگان، قبلاً مستقل، که در گذشته از آن سخن رفت، انجام داد نمونه‌گویای آن فرایندی است که در مناطق متعددی از فرانسه دیده شد. این سازمان تا حدی استانده کردن شکلهای جریان، ولتاژ و بسامد را پایه گذارد.

در اواخر این مرحله این بخشها به توسط یک شبکه منطقه‌ای با یکدیگر مربوط شدند. و نخستین شبکه انتقال برق فرانسه با ۱۲۰ کیلوولت را تأسیس کردند.

اتصال به یکدیگر و شبکه‌های انتقال: در سال ۱۹۳۰ ولتاژ ۱۲۰ کیلوولت برای شبکه جنوبی - غربی، و نیز شبکه‌ای که در آن زمان نیروگاههای گرانکوه مرکزی را با نیروگاههای منطقه پاریس مربوط می‌کرد، پذیرفته شد.

مرحله دیگری در این تاریخ آغاز شد. در طی این مرحله، شبکه‌های جدید ۱۵۰ کیلوولتی ایجاد شدند اما خطوط فشارقوی نیز برای اتصال چندین شبکه ۲۲۵ کیلوولتی با یکدیگر، تأسیس شدند: گرانکوه مرکزی با غرب و جنوبی - غربی، شبکه Est و آلپها با منطقه پاریس. این کار، در سالهای ۴۰ تا ۴۴ با ساخت دو شبکه بزرگ مرتبط با هم ۲۲۵ کیلوولتی برای سراسر فرانسه به پایان رسید.

مرحله سوم، سالهای ۱۹۴۵ - ۱۹۶۵ را فرا می‌گیرد - دوره‌ای که طی آن وسایل تولید کلاسیک، همان‌طور که دیدیم، متحول شد و در سال ۱۹۵۶ ازدواج با شبکه انتقال نخستین گروه حرارتی هسته‌ای در مارکول انجام گرفت. در سال ۱۹۵۸، نخستین خط انتقالی ۳۸۰ کیلوولتی میان مناطق آلپها و پاریس بهره‌برداری شد و در جریان همین دوره، چندین خط انتقال ۳۸۰ کیلوولتی در سراسر فرانسه کشیده شد، درحالی‌که کار اتصال زنجیری شبکه‌های ۲۲۵ کیلوولتی تخفیف یافت. این نوع عملیات مزدوج تقریباً در همان اوان در همه کشورهای صنعتی جریان داشت؛ حتی اگر یک سازمان ملی آن را رسماً اعلام نکرده بود، یا اگر منابع انرژی مورد بهره‌برداری هم به اندازه فرانسه متنوع نبودند. مثلاً در بریتانیای کبیر، یک کمیته مرکزی برق در سال ۱۹۱۹ - ۱۹۲۰ مأمور شد تا طرح یک شبکه سراسری the Grid را برای ایجاد یک شبکه انتقال فشارقوی بررسی کند که نخستین آنها در یک دهه تحقق یافتند.

فشار ۳۸۰ کیلوولت برای انتقال برق، که اصل آن در کنفرانس بین‌المللی برق در سال ۱۹۴۷ در لوسرن پذیرفته شد به طرحهای ارتباط شبکه‌های ملی در اروپای غربی پاسخ می‌گفت، طرحهایی که بزودی به اجرا درآمدند. اما این ولتاژ، حداکثر فشاری که می‌توانست برای انتقال در فاصله زیاد

به کار آید، نبود.

انتقال فشارقوی: گرایش به بالا بردن ولتاژ مقرر برای انتقال، از همان آغاز این سده برای پاسخگویی به تقاضاهای نامطمئن، فزون طلبی تکنسین ها در تحت پوشش گرفتن فواصل دور به وجود آمد. ممالک متحدۀ امریکا، در جریان پیشرفتهای فنی و اقتصادی خود، که هر دو جنگ جهانی آن را بسیار شتاب دادند، به علت گسترۀ زیاد سرزمین خود، در رأس این تکنیک قرار گرفتند.

استانده *Very high voltage* یا (VHV) برای ۱۱۰ کیلوولت، در کالیفرنیا در سال ۱۹۰۸ در مسافتی حدود ۲۵۰ کیلومتر عملی شد. فشارهای برق انتقالی بین ۱۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت، در مدتی کمی بیش از ۲۰ سال تغییر کرد و در خطی به طول ۵۰۰ کیلومتر از سد تولید برق هوور که روی کلرادو ساخته شده بود، فشار به ۲۸۷ کیلوولت رسید. بیست سال بعد، در ۱۹۴۵، استانده تازه ای با نام *extra high voltage* (EHV) برای ۳۴۵ کیلوولت تعیین شد. این ولتاژ در شرایط خوب اقتصادی، انتقال جریان متناوب به مسافتی برابر ۷۶۰ کیلومتر را ممکن می ساخت. در سال ۱۹۶۵ این رقم به ۵۰۰ کیلوولت افزایش یافت و تکنسین های امریکا، امکان گذر به ۷۰۰ و سرانجام ۱۰۰۰ کیلوولت را مورد بررسی قرار دادند.

چنین کوششهایی در کشورهایی انجام گرفت که در آنها مسأله طی مسافتهای زیاد، برای ربط دادن یک شبکه ملی، به واسطه جغرافیای منابع انرژی هیدرولیکی، الزامی بود. در سوئد، در سالهای ۱۹۵۰ - ۱۹۵۲ ایجاد یک شبکه ۴۰۰ کیلوولتی شروع شد تا خطوط توزیع را در مسافتی نزدیک به ۱۰۰۰ کیلومتر، تا جنوب شبه جزیره، تغذیه کند. اتحاد جماهیر شوروی (سابق) به علت وسعت زیاد، در سال ۱۹۶۱، خطوط با فشار بالا، ۵۰۰ کیلوولت را به خدمت گرفت و کانادا که مخازن وسیع انرژی هیدروالکتریک کبک، و خلیج هودسن را در سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ تجهیز کرده بود خطی برای انتقال برق ۷۰۰ کیلوولتی در مسافت ۱۰۰۰ کیلومتر احداث کرد.

بازگشت به جریان مستقیم: از همان ابتدای سالهای ۶۰ تکنسین ها باید می دانستند که انتقال جریان متناوب با فشارهایی در این ردیف - زمانی که مسافتهای بالاتر از ۶۰۰ یا ۶۵۰ کیلومتر مطرح است - بیش از جریان مستقیم هزینه دارد. این انتقال بوسیله کابل هوایی انجام می گرفت و بهای کابل های مسلح با مقدار اتلاف زیاد، بدلیل فشار بالا افزوده می شد. انتقال برق با کابل های زیرزمینی با تکنیک حفر سریع و اقتصادی کانالها که آزمایش خود را در تأسیسات لوله کشی برای انتقال گاز و نفت داده بود، برای جریان متناوب با فشار بسیار بالا عملی نبود، بنابراین، جریان مستقیم مطرح شد که روغن های عایقکاری را هم فاسد نمی کند. آیا باز هم می بایست علاوه بر تبدیلگر (کنورتیسور) های

گردان که از همان آغاز برق صنعتی با آن آشنا شدند، وسایل دیگری برای تغییر شکل جریان به کمک گرفت؟ وسایل فنی جدید لازم، با پیشرفت تبدیلگرهای با بخار جیوه به دست آمده بودند و به بهتر شدن کار یکسوکننده‌های سر و ته خط کمک می‌کردند. فرایندی که در آغاز سالهای ۶۰ به کار گرفته شد، چنین بود: ژنراتورهای کارخانه، جریان متناوبی با ۳ تا ۵ هزار ولت تولید می‌کردند، ترانسفورماتورهای استاتیک آن را به جریان دارای فشار بسیار بالا تبدیل می‌کردند. یکسوکننده‌های با بخار جیوه آن را گرفته، جریان مستقیمی دارای همان فشار بیرون می‌دادند. جریان مستقیم دارای فشار بسیار بالا، در انتهای خط انتقال وارد یک موج‌ساز بخار جیوه‌ای می‌شد و جریان متناوبی می‌داد که فشار آن تا ارتفاع توزیع در یک نیروگاه ترانسفورماتورها کاهش یافته بود.

نخستین خط انتقالی جریان مستقیم، در سال ۱۹۵۴ و در سوئد برقرار شد. این خط، تنها ۱۰۰ کیلومتر را می‌پوشانید و فشار آن هنوز فقط ۱۰۰ کیلوولت بود. در اتحاد جماهیر شوروی (سابق)، در سال ۱۹۶۲ انتقال برق مستقیم با فشار ۸۰۰ کیلوولت را تجربه می‌کردند، و در ممالک متحده آمریکا طرحی برای اتصال تهیه می‌شد که ۱۰۰۰ کیلومتر ساحل اقیانوس کبیر را با فشار ۷۵۰ کیلوولت می‌پوشانید. در جهان از آن پس، بررسیها و کارهای زیادی انجام گرفته است.

جریان مستقیم تنها برای انتقال فشار بالا پذیرفته نشد. در سال ۱۹۶۱، اتصالی از بولونی به لید<sup>۱</sup> بین شبکه‌های فرانسه و بریتانیا به خدمت گرفته شد. چون این کار جز از طریق کابل زیر دریا نمی‌توانست عملی شود، از جریان مستقیم با فشار متوسط ۲۰۰ کیلوولت استفاده شد.

بر پایه این نمونه‌ها می‌توان نوعی فرایند تحول تکنیکهایی را مشاهده کرد که در رشته‌های غیربرقی هم نظیر آنها وجود داشت. در این مورد، جریان مستقیم که دهها سال بود کنار گذاشته شده بود، تنها وسیله قابل استفاده برای ورود به مرحله تازه‌ای از پیشرفت شد.

مشکلات مربوط به تنظیم و حمایت: گسترش ارتباطات شبکه‌ها و انتقال برق به مسافتهای دور، در گروی حل دائمی تعداد روزافزونی از مشکلات بود. مشکلات تکنیکی، نخست مثلاً برای تنظیم فشار و جریان در همه نقاط شبکه. آقای بوشرو<sup>۲</sup> فیزیکدان فرانسوی، در آغاز همین سده، پدیده توان هرتز (راکتیف) را آشکار کرد که مربوط به اختلاف فاز ولتاژ با دوره جریان متناوبی است که جهت را برای یک دوره ۵۰ هرتزی، صد بار تغییر می‌دهد. فشار حداکثر، حذف می‌شود و به حداکثر در جهت مخالف باز می‌گردد، آن‌گاه تغییر شکل معکوسی را پنجاه بار در ثانیه تحمل می‌کند. برای اینکه این اختلاف فاز حذف شود باید رگولاتورهای خودکار و نیز جبران‌کننده‌های همزمانی عمل کنند.

مشکل دیگر، همانا بازتاب اختلالات و کوتاه مداریهای یکی از شبکه‌ها، در مجموعه شبکه‌های مرتبط با یکدیگر است. حتی در سال ۱۹۶۵ هم دیده شد که این بازتاب چگونه گام به گام پیش رفت و کار کل شبکه را، زمانی که نیویورک برای چند ساعت بکلی از برق محروم شد، مختل ساخت. برای جبران این آثار انتشار یابنده، نوعی رله ویژه (رله تقاضایی، رله امیدانس یا راکتانس) به نسبتی که سیستم ارتباط شبکه تکامل یافت به کار گرفته شد.

عمومی شدن وسایل حفاظت با تکامل تدریجی الکتروتکنیک تجربی، که پژوهشهای نظری بیش از پیش به آن یاری می‌رسانیدند تأمین شد.

ردیفی از دیژونکتورها که با شروع توزیع جریان برق ساخته شدند و در تأسیسات برق‌رسانی، به کاراندازی، قطع و غیره وارد شده بودند بمنظور رفع نیازهای همه شکلهای و فشارهای جریان، از تولید تا مصرف، با وسایل تازه‌ای گسترش چشمگیری یافتند. سرعت کار خط انتقال، یکی از هدفهایی بود که در پی آن بودند. در جریان مراحل پایانی تکامل شبکه‌های توزیع، هم چنین توانستند وسایلی را به کار گیرند که پس از رفع اختلالات محلی، اتصال مجدد به طور خودکار انجام گیرد.

تقسیم توان مؤثر یک واحد تولیدی بین شبکه‌ها، از همان آغاز، یک موضوع توافق و همکاری اداری، در سطوحی بتدریج بالاتر شد، تا آنجا که به مرحله توافق بین‌المللی کشیده شد. اما طبعاً این کار هم به نوعی سازمان فنی نیاز داشت که اصطلاح بسیار گویای آن *dispatching* است که تقسیم جریان تولیدی در همه کارخانه‌ها در شبکه‌های انتقالی و متناسب کردن آن با تقاضاهای متغیر مصرف را پیوسته مراقبت و تأمین می‌کند.

این کار بتدریج از مقیاس محلی، همراه با پیشرفت ارتباط خطوط، به مقیاس مرکزی رسید. وسایل ارتباطی که پیوسته تکمیل شده‌اند، از تلفن معمولی به تابلوهای علامتدهی امکان داد که دیسپاچینگها، در عین حال که دستورهای اجرایی را به طرف مقابل انتقال می‌دهند همه اطلاعات لازم برای کار خود را دریافت دارند. این مغز یک سازمان فنی، که متمرکز است، می‌بایست در جریان دهه‌های اخیر به وسایل رویت، گرچه نموداری اما با جزئیات فراوان، شبکه‌ای که آن را هدایت کند مجهز شده باشد و ماشینهای حساب به آن امکان دهند که با هر وضعیتی مقابله کنند. بنابراین، کارتهای یک مولد، که از یک سده پیش، حادثه منفردی بوده است، در اثر فشار در آغوش برق سراسری جهان، آیا به پدیده‌ای احتمالی نوری یک مجموعه، که همه فعالیتها در آن باید همکاری اکید و پیوسته‌ای داشته باشند تبدیل نشده است؟

مشکل خطوط: عناصر اساسی انتقال و توزیع برق، خطوط، برای اینکه با مشخصات جریانهای مورد استفاده در دورانه‌های مختلف سازگار شوند تکنیک تازه‌ای را سبب شده‌اند که در آغاز برای یک تحقیق تجربی شکل گرفت اما بیدرنگ آن زمان که ولتاژ انتقالی به سطح معینی رسید نوعی تحلیل نظری چندین پدیده آن را در میان گرفت.

نخست این خطوط انتقال، صرفاً از کابلها و تکیه‌گاهها تشکیل می‌شدند. تلگراف مشکلات اولیه را حل کرد و راه‌حلهای آن، تا آن زمان که ولتاژ جریان توزیعی پایین بود باید بدون تغییری، کارا باشند. یک سیم فلزی که بازویی که در بالای دکل چوبی پیچ شده بود آن را نگاه می‌داشت. برای برقراری نخستین خطوط هوایی کافی بود. به دلایل اقتصادی، در آغاز از سیمهای فولادی به قطر چهار میلیمتر استفاده می‌شد، اما پس از مدتی اندک، سیمهای مفرغی، که رسانایی برقی آن ۹۷٪ سیمهای مسی الکترولیتی است، به‌کار برده شد.

دکلها، تنه‌های درختهای صمغی، عموماً صنوبر بودند که پس از خشک کردن، آنها را با سولفات مس یا کرومات آغشته می‌ساختند تا پوسیده نشوند. انتهای این دکلها تا آن اندازه، که در خاک فرو برده می‌شدند با قطران پوشیده، یا اینکه در سیمان فرو برده می‌شدند. عمل خشکاندن و تزریق کرومات، وسیله‌ای مناسب ایجاد می‌کرد. با اجرای این روشها، دکلهای چوبی عمری حدود بیست سال به‌دست آوردند.

در بالای این دکلها، بازوهای فلزی مجهز به مقره‌هایی، سیمهای برق را نگاه می‌داشتند. این مقره‌ها از استوانه‌های چینی به‌شکل مناسب خطوط تلگراف ساخته شدند. اما بعدها قطعات چینی ساخته شده با روشهای ویژه و سپس شیشه‌های تابدیده کم‌کم جانشین استوانه‌های چینی شدند. شکل مقره‌ها، سر، گلو و دامن آنها نیز بررسی شدند تا اینکه عایقی توانا میان سیم هادی و بخش فلزی تکیه‌گاه آن باشند. شکل آن بتدریج که ولتاژهای انتقالی بالاتر می‌رفت، مناسبتر می‌شد.

از همان آغاز دیده شد که توزیع شهری با خطوط زیرزمینی انجام می‌گرفت. در شهرهای بزرگ، بویژه در پاریس، یکی از شرایطی که مقررات استانده به شرکت‌های دارنده امتیاز تحمیل کرد، این بود که باید در کانالکشی زیر پیاده‌روها فاصله معینی از ساختمان رعایت شود. بدین ترتیب می‌خواستند امنیت اشخاص تأمین شده باشد اما ضمناً قدغن شد که راه‌حلهای عمومی نباید، مثل نیویورک در سالهای پس از موفقیت ادیسن، با تراکمی از سیمهای هوایی پوشیده شود. باین‌حال، در کمونهای روستایی و شهرستانهای متوسط، توزیع برق با سیمهای هوایی ادامه یافت.

در اجرای تأسیسات زیرزمینی، نخست مفتولها و کابلهای مسی لخت را روی مقره‌های ثابت

در کانالها نصب می‌کردند. برای مقابله با خطرات احتمالی این طرز کار، در آغاز از حفاظ مختصری، پیچانیدن عایق روی کابلی که بعد از لوله آهنی می‌گذشت، که راه حل ادیسن بود، یا رد کردن کابل لخت از لوله سفالی استفاده می‌شد. اما می‌بایست به عایق کردن و حفاظت مکانیکی بهتری دست می‌زدند. همه شرکت‌های دارنده امتیاز در آن زمان از کابل‌های مسلح دارای دو پوشش استفاده می‌کردند. کارگاه‌های مخصوص بی‌درنگ به تولید صنعتی آن روی آوردند. از جمله این کارگاه‌ها می‌توان از کارگاه بلفور<sup>۱</sup> وابسته به شرکت ماشین‌سازی آلزاس در سالهای ۸۰ نام برد.

تحول خطوط: در همه دورانهای تکامل رشته برق، تکنسین‌ها بین خطوط انتقال فشارقوی - حتی اگر از چند هزار ولت زیادتر نبود - و خطوط توزیع که در اوایل کار، تنها چند متر بیش نبودند، فرقی نمی‌گذاشتند. نوع دشواریهای تکنیکی که از ابتدا مطرح شدند هنوز هم تفاوتی نکرده است و راه‌حلهای پیشنهادی بتدریج که الزامات شدیدتری در اثر فشار جریان‌هایی که با آن سروکار دارند تحمیل می‌شوند، منظمأً تغییر کرده‌اند.

بررسیهای مهندس مونپلیه در سال ۱۹۰۸، که از آن یاد شده است نشان داد که در آن زمان تصور می‌کردند که حد طول خطوط نیرو برای بهره‌برداری صنعتی، با جریان متناوب سه فاز و ۵۰ هرتز، برای فشار ۶۰ هزار ولتی با اتصال ستاره، ۲۰۰ کیلومتر است. دشواریهای ظریف تنظیم فشار در ورودی ظاهراً برای خطوط طولیتر در این بسامد برطرف نشده بودند. یکی از اولین طرحهای انتقال در منطقه رون علیا، نزدیک منطقه پاریس، مسافت ۴۵۰ کیلومتر را با فشار ۱۲۰ هزار ولت، اما تنها برای فرکانس ۲۵ دور، بررسی می‌کرد. در عمل فشارهای خطوط از ۲۵ تا ۴۵ هزار ولت (با اتصال ستاره‌ای) تغییر می‌کرد و این مقادیر؛ پیش از جنگ جهانی اول، بندرت زیادتر شدند. اما دسترسی متالورژی به برق صنعتی، وسایل تولید جدیدی ایجاد کرده بود که دقیقاً به سود پیشرفت الکترونیک بود: تولید مس ناب از راه الکترولیز، از همان ابتدا، و ساخت ارزان آلومینیم، که از پایان سده نوزدهم، به فلز رایجی تبدیل شده بود.

سیم مسی یا مفرغی با رسانایی زیاد برق، در حالت کشیده شده، در برابر فشار ۴۵ کیلوگرم بر میلیمترمربع پاره نمی‌شد، در آغاز از سیمهای تکی ضخیم با چند رشته بهم تافته متشکل از ۷، ۱۹ یا ۳۷ رشته زیاد استفاده می‌شد. در سال ۱۹۰۳ تولید کابل‌های آلومینیومی آغاز شد، برای اینکه رسانایی کمتر این فلز جبران شود قطر آن را بیشتر از کابل‌های مسی گرفتند. بنابر علل مکانیکی، در این صورت افزایش فاصله ذکلهای حامل کابل از یکدیگر ممکن شد. اما آلومینیم تنها، نواقصی داشت: کمبود صلبیت و دشواری اتصال آن با مس. کابل آلومینیومی پس از چند سال خدمت،

جای خود را به کابل‌های دارای مغز فولادی وا گذاشت، بخصوص اینکه کابل‌هایی از آلایزهای آلومینیم به‌کار گرفته شدند که ترکیب شیمیایی آنها در آن زمان که ارتباطات شبکه‌ای تازه آغاز می‌شد، بدقت بررسی شده بود.

انواع تکیه‌گاه‌های دیگر، به دنبال افزایش فاصلهٔ دکل‌ها از یکدیگر و نیز مقدار فشار، ساخته شدند. چوب تا مدتها به‌کار گرفته می‌شد و نخست صرفاً، به علت قدرت عایق بودن مخصوص خود، تنها مادهٔ مورد استفاده بود. به جای بازوهای فولادی گاهی از تراورسهای چوبی جهت ثابت نگاهداشتن مقره‌ها استفاده می‌شد.

طرز گذاشتن مقره‌ها در سر دکل‌ها، طی سالهای ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰ قواعد تجربی خود را به دست آورد. قواعدی که برای استقرار خطوط با فشار زیاد روی برج‌های فولادی، متحمل تغییرات اساسی شد.

برج‌های فولادی در شکل لوله‌ای در سال ۱۸۹۸ در ایتالیا برای خط پالرمو به میلان ساخته شدند. بُرد این برج‌ها که با دکل چوبی ۴۰ تا ۵۰ متر بود، در این صورت از ۶۰، سپس از ۸۰ متر در خط لنتسو-تورینو گذشت. در این زمان و سال‌های پس از آن، ارتفاع برج‌ها به ۱۵ متر می‌رسید. با استفاده از تکنیک تیر مشبک که از نیمهٔ سدهٔ نوزدهم برای ساختن پل‌ها رواج یافته بود، رفته رفته از برج‌های واقعی فلزی با قاعده‌ای بسیار باز استفاده شد که با در نظر داشتن استحکام مکانیکی کابل‌ها، به بردهای ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر دست یافتند. ابعاد، شکل و تجهیزات برج‌های فلزی، زمانی که موضوع انتقال برق با فشاری بیش از ۲۰۰ کیلوولت مطرح شد باز تحول یافتند. این عملیات در فرانسه در سال ۱۹۴۱، یعنی سالی آغاز شد که در آن همهٔ مؤسسات انتقال برق در سه شرکت دارندهٔ امتیاز گرد آمده بودند و این مرحلهٔ پیش از ملی شدن خطوط در آوریل ۱۹۴۶ با تشکیل شرکت ملی برق فرانسه *Électricité de France* بود. در فرجه ۱۹۴۱ - ۱۹۵۰ کار انتقال برق با ۲۲۵ کیلوولت انجام می‌گرفت، اما همهٔ تجهیزات برای تحمل ۳۸۰ کیلوولت پیش‌بینی شده بودند. بعضی از خطوط برق را می‌شد بدون تغییر برای ولتاژ جدید به‌کار گرفت.

در همین دوران است که برج‌های دارای بازو و تراورس به‌کار گرفته شدند. این برج‌ها، تیرهای مشبکی بودند که همهٔ شبکه‌ها را به یکدیگر مرتبط می‌ساختند و مسافتی برابر چندین صد کیلومتر را به هم پیوست می‌دادند. در مدت تأخیرهای تغییر شکل فشار ولتاژ، یک سر این تراورس یک خط ۲۲۵ و سر دیگر آن خط ۳۸۵ کیلوولتی را حمل می‌کرد. سرانجام پس از آغاز سال‌های ۵۰، که این تجهیزات به سنگینتر شدن خود ادامه دادند برج‌های پل‌مانندی ساخته شدند تا فواصل زیاد را



با ارتفاع زیاد، مثلاً از فراز دره‌ها، بیوشانند. معلوم است که ساخت این شبکه‌های انتقال برق تنها با استفاده از بعضی تکنیکهای ساختمانهای فلزی می‌توانست عملی شود، همان‌طور که در همه ادوار، ساخت همه مصالح تولیدی و مصرف، دستخوش تحولی از تکنیکهای مکانیکی صنعتی و متالورژی بوده‌اند.

بتن مسلح و بتن پیش تنیده جهت ساختن دکلها، به ترتیب به‌کار گرفته شدند و هنوز هم از آنها استفاده می‌شود.

تحول دکلهای تکیه‌گاهی، طبعاً تابع تحول مقره‌ها بود. مشخصات مکانیکی و برقی آنها می‌بایست به الزامات بیش از پیش متحولی، پاسخ دهند، که با توجه به مطالب گفته شده، درک آن دشوار نیست. باز در اینجا تحول تکنیک چیزی جز دنبال کردن اطلاعات اساسی که در همان سالهای نخست بهره‌برداری به‌دست آمده‌اند، نیست؛ اما باید این نکته را در نظر داشت که زمانی که با چند ده هزار ولت کار می‌شود بعضی آثار ناچیز ممکن است قدرتی غیرمنتظره یابند. زمانی که به فشارهای ۴۵ تا ۶۰ کیلوولت رسیدند بررسیهای پیگیری آغاز شد.

یک ولتاژ اضافی اتفاقی می‌تواند مقره را در اثر جرقه زدن یک قوس بین رسانا و تکیه‌گاه فلزی، سوراخ کند. اما گرد و غبار و رطوبت متراکم شده روی سطح بیرونی مقره، طی زمان، برای ایجاد قوسی، که مقره را دور بزند، کافی است. بر آن شدند که مثلاً با توسعه دامن مقره، برای جدا کردن حتی‌الامکان جریان قطرات آب از محور تکیه‌گاه فلزیش، از آن جلوگیری کنند. زمانی که عصر ولتاژهای بسیار زیاد با دکلهای فلزی تراورسدار آغاز شد، شکلهای دیگری از مقره به‌کار گرفته شدند. کابلها روی تراورسها با کمک ردیفی از مقره‌ها، که تا حد امکان کابلهای رسانا را از ساختمان فلزی برج دور می‌داشتند، آویزان نگاهداشته شدند.

رفتار خط: گرچه این تحول جمعی، در آغاز در پی تنها بررسی تجربی پدیده‌هایی بود که تکنسین‌ها طی نخستین دهه‌ها با آنها روبه‌رو شده بودند، این تحول نمی‌توانست از آستانه، فراتر برود، گرچه این تکنسین‌ها به تحلیل نظری دشواریهایی که با آن برخورد می‌کردند توانا هم نبودند. مثلاً آزمایش مقره‌هایی که در زیر ولتاژهای بسیار بالا بودند، وجود تبخیرهایی را نشان داد که رفع آنها مستلزم بررسی تقسیم دوباره فشارها در طول سطح بیرونی است تا از عدم توازن در فضاهای کاهش یافته جلوگیری شود و تقسیم دوباره یکنواختی ایجاد شود.

همچنین در تاریکی، متوجه تصعیدهایی در اطراف سیمها شدند. تصعیدها، پدیده‌ای به نام اثر هاله‌ای ( $corona\ loss = \text{effet corona}$ ) را تشکیل می‌دهند و نتیجه یونش هوا می‌باشند، و

می‌توان آنها را به‌طور همهمه پیوسته‌ای در سراسر خط شنید. این اثر، خاستگاه اتلاف بیش از پیش زیاد سیمها، با بالا رفتن ولتاژ می‌باشد. این پدیده افزایش فاصله سیمها از یکدیگر و نیز کاربرد کابل‌های لوله‌ای را سبب شد.

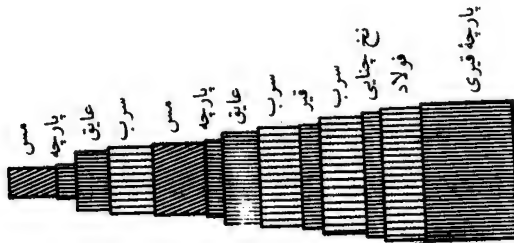
عوامل دیگر مؤثر در رفتار خط نیز رفته‌رفته شناخته شدند. آشکار شد که مقاومت کابل که در جریان مستقیم، پدیده ساده‌ای است، در جریان متناوب، بغرنج می‌شود. این جریان از تمام مقطع کابل به‌طور یکنواخت نمی‌گذرد، بلکه اساساً از محیط عبور می‌کند، و این حالت، مقاومت سیم را افزایش می‌دهد. تحلیل ریاضی این اثر شگفت‌آور، بررسی ساختمان فلزی مقطع کابلها را، برای محدود کردن نتایج آن، در پی داشت.

«راکتانس<sup>۱</sup>» خط، یا پدیده خودالقایی نیز همان‌طور که دیدیم، مربوط به اینرسی سیم در برگرداندن جریان به تعداد پنجاه بار در ثانیه است. زمانی که تنها با یک کابل منفرد سروکار داریم، مشخصه دیگری که از رفتار کابل نتیجه می‌شود «سوستانس» است که نتیجه جابه‌جایی الاستیکی، الکتریسته در پوشش عایق است. بدین ترتیب، نوعی جریان ظرفیتی (= خازنی) ایجاد می‌شود که انگیزه گرم شدن زیاد خط در اثر یک بار برقی کم است.

این چند نمونه که در واقع شمار فراوانی از پدیده‌های دیگر می‌توان به آنها افزود در اینجا از این لحاظ ذکر شد تا میزانی از اهمیت کار نظری به‌دست دهد کاری که به‌طور گروهی به توسط کارکنان علمی همه کشورهای که در این پژوهشها تخصص دارند، در نیمه اخیر این سده انجام می‌گیرد. کابل‌های عایق شده: دیدیم که خطوط زیرزمینی از همان نخستین دوره، برای توزیع برق در شهر کار گذاشته شدند و پس از مدت اندکی، عایق‌سازی کابلها به کمک مصالح موجود در آن زمان انجام گرفت. رسانای فلزی دارای یک مغز مرکزی از رشته‌های مسی درهم تابیده‌ای بود، که پارچه اندود شده‌ای بدون واسطه روی آن پیچیده شده بود. نخستین لایه یک ماده عایق، مخلوطی از روغنهای گیاهی بعدها، روغنهای معدنی - و قیر بود. کابل در غلافی از سرب کشیده می‌شد تا در برابر رطوبت هوا کاملاً محفوظ باشد، لوله سربی که نرم و کمی شکننده بود با یک ردیف پوشش عایق شبیه پوششهای قبلی حمایت می‌شد و بالاخره یک تسمه فولادی آن را در خود می‌گرفت که خود آن هم با پارچه قیراندودی پوشیده می‌شد. (شکل ۹۵).

مواد عایق‌کننده به سلیقه سازنده کابل و نوع منابع هر دوره، متفاوت بودند. کاتوچوی طبیعی، سپس رزینهای مصنوعی و یک ردیف تمام از فراورده‌های سنتزی از آغاز نیمه دوم این سده به ترتیب به‌کار گرفته شده‌اند. اما به‌طور کلی از راه و رسم ادوار اولیه دور نشدند. این کار با احاطه و

۱. reactance مقاومت در برابر عبور جریان متناوب و بخشی از امپدانس است. م.



شکل ۹۵. ساختار یک کابل توزیع برق (حدود ۱۸۹۰).

معرفت کامل از خواص مصالح به کار گرفته شده و نیز وسایل مکانیکی ساخت، که خود یک صنعت جانبی بسیار ویژه‌ای بود، انجام می‌گرفت.

کابل‌های زیرزمینی برای انتقال برق دارای ولتاژ زیاد، پیش از سال ۱۹۲۰ جلوه‌ناچیزی داشتند. هزینه این کار گزاف بود و ظرفیت زیاد آنها سبب می‌شد، هر زمان که به خطوط هوایی متصل می‌شدند، ایجاد ولتاژ اضافی، و به دنبال آن، در نقاط زیادی، ترق و تروق کنند. باین حال، از آنها نه تنها در سیستم پیشنهادی آقای توری برای انتقال جریان مستقیم استفاده می‌کردند، که مشکلات خاصی داشت، بلکه در اتصالات دارای فشارهای ۲۰ تا ۳۵ هزار ولت، ویژه صنعت نیز آن را به کار گرفتند. در این دوران همیشه از کاغذ آغشته به روغن معدنی و صمغ در زیر غلاف آب‌بندی شده با سرب و تقویت شده با آهن، تسمه یا سیم فولادی استفاده می‌شد. تنها سی سال بعد بود که کاغذ روغنی همه جا حاضر، کم‌کم واپس نشست، و تحول تکنیک‌های عایق‌سازی در آغاز سال‌های ۶۰، شتاب بیشتری گرفت.

عایق‌سازی در حمام روغن، که همان‌طور که دیدیم ابتکار ادیسن، بود، نیز رواج داشت. روش‌های این کار در زمان توسعه زیاد انتقال برق، پیرو نوع ابزار کاری بود که تکنیک برای آن تهیه کرده بود. در زمان اخیر، برای انتقال جریان فشار قوی، از کابل‌هایی استفاده شده است که با گازهای تحت فشار عایق شده‌اند.

کار توزیع برق، به معنی دقیق آن، از نیروگاه‌های نزدیک به مصرف‌کننده یا پست ترانسفورماتور، به نسبتی که مجتمعه‌های شهری افزایش یافته‌اند، در مسافت‌های بیش از پیش زیادی گسترده شده است و در عین حال، فشار توزیع در بخشها، آنچنان بالا رفته است. که در اوایل آن را فشار قوی گمان می‌کردند. خود خطوط انتقال، با کانال‌های زیرزمینی، از موانع طبیعی یا مصنوعی رها شده‌اند،

بنابراین کاربرد کابل‌های عایق شده بتدریج زیاده‌تر شده است. بدون اینکه از زمینه‌های تأسیسات ویژه‌ای مانند کشتیرانی یا هواپیمایی، و ارتباطات از راه دور، بایا بدون سیم - که انگیزه بررسی انواع کابل‌های دارای مشخصات چندگانه بوده‌اند - سخن گوئیم. برای انتقال نیرو، به معنی دقیق، چندین نوع کابل جهت پاسخگویی به همه نیازها، پیشنهاد شده‌اند. در سالیان ۶۰ توانستند کابل‌هایی بسازند که می‌تواند جریان متناوب ۵۰۰ کیلوولت را تحمل کند. گرچه از این مرز، بندرت فراتر رفته‌اند، اما معلوم است که این مانع با استفاده از جریان مستقیم با ولتاژ بسیار بالاتری هم، دور زده خواهد شد. برق صنعتی، تکنیک پیشتاز: برق یک سده پس از پیدایش، هنوز هم برترین تکنیک است. اما صنعت شیمی با اسناد اشرافیت قدیمتر، حدود دو سده، و الکترونیک، برادر کهنتر برق، در این افتخار با آن شریک هستند. آغاز آن مدیون روشن‌بینی گرام است که در شمار نوآوران منفرد است و نظرات وی بیش از نیم سده، بنیاد این دانش بودند. نخستین مراحل گسترش آن، نتیجه کارهای فردی بود و از بررسی‌های بیش از پیش هماهنگ نتیجه شده بود. اما اوج این شکوفایی در آغاز دهه دوم این سده، مرهون کار گروهی، با خصیصه توأم عمل و نظر بود.

ساختمان وسایل، در نتیجه تمرکزهای صنعتی و تأثیرهای اطلاعات فنی، علمی و اقتصادی، بتدریج طی دهه‌ها پیاپی، یکنواخت‌تر شدند. این صنعت از همان دهه‌های اولیه سده ما در فهرست مهمترین صنایع گنجانیده شده و تاکنون نه تنها مقام خود را حفظ کرده، که به اهمیت آن افزوده هم شده است. از مشخصات این صنعت، گوناگونی فراورده‌ها، ظرافت تکنیکهای آن در رشته‌های متعدد، و طبعاً فراوانی تکنیکهای سطح بالاست. تنها صنعتی است که در کشورهای دارای اقتصاد سوسیالیستی، در قلمرو بخش خصوصی باقی مانده است. در جریان دهه‌های اخیر، مشتریان آن، لااقل در بخشهای تولید، انتقال و توزیع، تقریباً در همه جا به صورت سازمانی تقریباً رسمی برخوردار از وضعیت دولتی درآمده‌اند، و تهیه‌کنندگان می‌بایست به این نکته توجه لازم را داشته باشند.

بهره‌برداری از منابع انرژی و شبکه‌های انتقال برق به پشتوانه واقعیات یا قانون تحمیلی، مرزهای سیاسی تقریباً همه کشورهای جهان را درنور دیده، و به نوعی همکاری جهانی انجامیده است. تحلیل تحول این نوع سازمان، می‌تواند تأثیر رشد تکنیک یک وسیله تولیدی و مصرفی را در زمینه‌های سیاسی و اجتماعی بنمایاند.

سنگینی برق صنعتی روی همه جنبه‌های اجتماع معاصر، همان‌طور که دیدیم، طی دهه‌های بین دو جنگ جهانی، حس شده است. این فشار کاهش نیافته است و بدون تردید در میان تکنیکهای تولید، هم‌اوردی جز شیمی صنعتی ندارد. این حقیقت اساسی بویژه بدین دلیل است

که با وجود دوران طویل تحول آن، این صنعت خصلت پیشتازی خود را از دست نداده است. این صنعت این مقام را تا مدتهای زیادی حفظ خواهد کرد؛ زیرا چنین نمی‌نماید که تکنیکهای تشکیل‌دهنده آن به حالت سیری و اشباع نزدیک شده باشند.

## کتاب‌شناسی بخش دوم

- La Lumière électrique*, périodique depuis 1879.
- ALGRAVE (E.) et BOULARD (J.), *La lumière électrique, son histoire, sa production et son emploi*, 1882.
- BLONDEL (A.) et PAUL-DUBOIS (F.), *La traction électrique sur voie ferrée*, 1898.
- BOUTAN et d'ALMEIDA, *Cours élémentaire de physique*, 1842 et plusieurs rééditions.
- CAZIN (A.), *Traité des piles électriques*, 1880.
- DU MONCEL (T.), *Les applications de l'électricité*, 1856 et plusieurs éditions.
- DUMONT (G.), *Dictionnaire d'électricité et de magnétisme*, 1889.
- DUNSHEATH (P.), *A History of electrical Engineering*, 1962.
- GEORGE (P.), *Géographie de l'électricité*, 1973.
- JOSEPHSON (M.), *Edison*, 1959.
- KING (W. J.), *The Development of Electrical Technology in the 19th Century*, United States National Museum, Bull. 228, 1962.
- MARÉCHAL (H.), *L'éclairage à Paris*, 1894.
- MONTPELLIER (J. A.) et HOSPITALIER (E.), *L'électricité à l'Exposition de 1900*, 1902.
- MONTPELLIER (J. A.), *Les dynamos*, 1897.
- NIAUDET, *Machines électriques à courants continus*, 1881.
- SARTIAUX (E.) et ALIAMET (M.), *Principales découvertes et publications concernant l'électricité*, 1903.
- A utiliser avec précaution.
- SHARLIN (H. I.), *The Making of the Electrical Age, from the telegraph to automation*, 1963. Succinct et confus.
- THOMPSON (S. P.), *Courants polyphasés et alterno-moteurs*, 1896.
- THOMPSON (S. P.), *Traité des machines dynamo-électriques*, 1894.
- WOODBURY (D. O.), *Elihu Thomson, Beloved Scientist*, 1960.

بخش سوم

صنایع بزرگ شیمیایی



## تحول روشهای کلاسیک

در نیمه نخست سده نوزدهم، صنعت شیمی، بدون اینکه پایه‌های فنی آن از وضع اولیه خود، چندان دورتر رفته باشند، چهره صنعت سنگینی را یافته بود. در واقع می‌توان ادعا کرد که هم روشها و هم وسایلی که در صنعتی کردن تولیدهای بزرگ کربنات سدیم و اسید سولفوریک به‌کار گرفته شدند با آنچه که در کارگاهها یا تولیدکنندگان خرده‌پای سده پیش به‌کار می‌رفتند، تفاوت اصولی نداشتند. برتری عملگران: نوآوریها، ثمره آزمودگی در به‌کارگیری راههای هوشمندانه است. نوآوری، توجهی به دانشهای تازه ندارد. اطاقهای سربی، پیش از نفوذ اصول شیمیایی لازوازیه وجود داشته است. روشهای لوبلان، اساساً عملیاتی از نوع تجزیه مضاعف با خصلت سنتی بوده است. این صنعت، گرچه تازه پدید آمده بود، ادامه یک زنجیره تولیدها بود. تعمیم اطاقهای سربی و بعد تکمیل این روش، دلیلی جز افزایش نیاز به اسید سولفوریک نداشت. عملیات سودسازی لوبلان، نخستین نیاز به اسید سولفوریک را موجب شد و تولید اسید سولفوریک را از مقیاس آزمایشگاهی به تولید برای مصرف عظیم، متحول ساخت.

اسید سولفوریک که با بهای ارزان در دسترس قرار گرفت، پس از مدتی بسیار کوتاه وارد

چرخه‌های دیگر تولید شد و صنایع بزرگ معدنی، که در میانه سده نوزدهم، کاملاً سازمان‌یافته و مستقر می‌نمودند، قد برافراشتند.

طبعاً پیشرفتهای دانش شیمی در این نخستین تحول، کاملاً بی‌اثر نبوده‌اند. زبان مشترک و بیانی که همه‌جا نفوذ کرده بود، درک واکنشهایی را که در تولیدهای صنعتی به‌کار می‌رفتند، آسان می‌ساخت. این امر جهت‌یابیهای آزمایشی را تسهیل کرد، انواع تجربه‌ها، گزینشها و اتخاذ تصمیمات مستدل را ممکن ساخت. این زبان بویژه به نفوذ هرچه سریعتر دستاوردهای فنی خدمت کرده است. مفاهیمی، بویژه مربوط به کاتالیز، بخوبی بیان شدند. همه اینها در سرگذشت اسید سولفوریک مندرج است، و نیز در تاریخ سود مصنوعی، که هنوز همه‌چیز آن، تجربی مانده بود؛ حتی در بیشتر کتاب بزرگ *Traité de la fabrication de la soude* نوشته ژورژ لونز<sup>۱</sup>، که بهترین کتاب تکنولوژی شیمی در بیست سال پایانی سده نوزدهم به‌شمار می‌رود، این حالت بیشتر به‌چشم می‌خورد.

فراوانی نسبی اسیدهای معدنی به پیشرفت صنعت فراورده‌هایی که از مواد جانوری و گیاهی استخراج می‌شدند کمک کرد و پیشرفت صنعت اخیر نیز همراه با پیشرفت صنایع معدنی، در تحول صنایع شیمیایی در اواسط سده نوزدهم، یک عامل اساسی بود. بهتر کردن مواد آلی، شاخه مهمی از صنعت شیمی سنتی شده بود. صفت جدید بودن، تنها از این لحاظ به آنها اطلاق می‌شد که شماری از فراورده‌های جانشینی، مانند قندچغندر، گاهی با بهای کمتر و کیفیت بهتر، مانند شمعهای استتاریک، پس از رفع دشواریهای مربوط به تولید صنعتی، مشتریان بسیار فراوان داشتند. دستاورد دانش شیمی در این شاخه بسیار نابرابر بود. این دستاورد درباره چغندر قند، کاغذ چوب، صفر بود و در ساخت شمعهای استتارینی، زمانی که مناسب کردن ترکیبات سلولوزی آغاز شد، بسیار اساسی.

ابتدال دستگاهها: قبل از هرچیز، تکمیل آرام دستگاهها بود که گوناگونی فراورده‌ها را ممکن ساخت و فراورده‌های جدیدی به بازار آورد که هیچ چیز اصیلی در آنها دیده نمی‌شد و هنوز قابل استفاده نبودند؛ زیرا فراورده‌هایی که از آنها به دست می‌آمد فروش بازرگانی نداشتند. مثلاً مورد تقطیر چوب را بررسی کنیم. آقای فیلیپ لوبون، همان‌طور که دیده شد، سودی که از فراورده‌های تقطیر خشک چوب برای صنعت در آینده متصور بود بروشنی درک می‌کرد. برخیها خواسته‌اند وی را، لااقل در فرانسه، مخترع گاز روشنایی بدانند، که یک خطای تاریخی است. تنها آزمایش وی برای کاربرد گاز چوب بمنظور روشن‌سازی خانه‌ها، علی‌رغم شناگوییان سده نوزدهم، به شکست انجامید. این آقایان توجه نکرده‌اند که اختراع لوبون تنها از لحاظ فراورده‌های مایع و جامدی اهمیت دارد که از تقطیر



خشک چوب به دست می‌آیند. اما سالهای نخستین سده نوزدهم، مهارت در ساخت دستگاههایی که بتوان با آنها کارهای سودآوری انجام داد هنوز در سطح بسیار ابتدایی بود. فرآورده‌هایی که با هزینه سنگین گردآوری شده بودند در گودالی از وسایل بسیار پیچیده سقوط می‌کردند که انگیزه ساخت آنها چیزی جز ارضای کنجکاوی نبود. تهیه اسید استیک از سرکه تخمیری با روش اورلثان، برای مصارف کوچک، بیش از تهیه آن از راه تقطیر خاک اره در دیگهای بخار و قیر و انبیهها رواج داشت.

در آغاز نیمه دوم سده نوزدهم، وضع تغییر یافت. دستگاههای شیمی صنعتی، کمتر جنبه صنعتگری داشتند. به علت نیازمندیهای صنایع در نیمه نخست این سده، صنایع پررونق عبارت بودند از: سود کربناتی و مشتقات آن، اسید سولفوریک و دیگر اسیدهای معدنی، که هنوز یک فرآورده جانبی مزاحم تلقی می‌شد، ساخت شمعهای استتارینی، قند چغندر، و بالاخره، گاز روشنایی. ساخت این مواد، یک کار تخصصی بود. تکنیکی مطمئنتر برای ساخت بخشهای مصالح ساختمانی، اجسام نسوز، سفالگری به دست آمده بود. تولید لوله از سفال، چدن و حتی از فولاد در صنایع تخصصی انجام می‌گرفت. دیگهای بخار، ناقوسها، مخازن آب، ستونهای فلزی ستبر، مارپیچی یا صاف جذب یا تقطیر، هنوز در صورت تقاضا ساخته می‌شدند اما از انواع بسیار پیشرفته و همراه با اصلاحاتی برای پاسخگویی به تولیدهای گوناگون. وانگهی ردیف کاملی از وسایل جدید، برای تسهیل عملیات صنعتی گوناگون ساخته شدند: تلمبه‌ها، تلمبه‌های اسید، مکشها، بادزنها. این وسایل هر قدر که کمتر با دست عمل می‌کردند، بیشتر کارایی داشتند؛ چنانچه در واحدهای بزرگ صنعتی، بوسیله ماشینهای بخار فعال می‌شدند.

این، صندوق مشترکی بود که ابتذال آن آغاز شده بود، اما تحول آن هنوز تنها به هوشمندی عملگران در دشواریهای سنتی: تخریب خشک، اسیدی کردن، خنثی‌سازی، تقطیر، تبخیر، تبلور، شست‌وشو، خرد کردن، تلمبه‌زنی و غیره، بستگی داشت. ابتذال دستگاهها، دقیقاً سراسر کارهای جاری را شامل می‌شد. این ابتذال که بوسیله پراتیک صنعتی، جدید تحمیل شده بود نابودی خصیصه سنتی را در آن سبب شد - پراتیکی که در نخستین دهه‌های سده نوزدهم هنوز خودنمایی می‌کرد و صنعت شیمی را به سوی ساختار دیگر، که کلاسیسیم، همه صنعت شیمی سده نوزدهم و حتی کمی از سده بیستم را با آن خواهد پیمود، به پیش می‌راند. تغییر شکلهای این صنعت، تا واسطه سده بیستم، در اثر شکستهای چشمگیر پایه‌های آن نبوده است. در پشت روشهای کلاسیک سده نوزدهم، اصول سنتی وررفتن با وسایل و تأثیر عوامل شیمیایی معتبر در سده هجدهم و سده‌های پیش از آن، پنهان شده بودند. زبان صنعتی و بازرگانی با کهنگی زیاد خود، به نوعی ایمان تبدیل

شده بود. هنوز در سالهای ۱۹۰۰ - ۱۹۱۰ از زیت الزاج *Huile de vitriol* سوبلیمه خورنده و جوهر نمک *Esprit de sel* صحبت می‌شد و نیز اصطلاحات فراوان دیگری، که مستقیماً از پراتیکهای سده‌های چهاردهم و پانزدهم برگرفته شده و قابل فهم بودند و عملگران آن را در می‌یافتند. جهشی بر اثر شکافت لایه‌ای: اما در جنب این پیروی از سنت که کمی هم در ذات خود نو شده بود، هرچند که در روشهای خود لجوجانه انتقال داده می‌شد، شاخه‌های دیگری از شیمی صنعتی، پیشرفت خود را خوشبختانه، آغاز کردند. از این گفته نباید گمراه شد، زیرا جانشین کردن تکنیکهای نوین، هنوز هم در میانه سده نوزدهم، کمی جسورانه بودند. گرچه شمع‌سازی با استتارین بزودی راه خود را باز کرد، قند چغندر و تقطیر زغال سنگ چنین نبودند. وانگهی از پراتیکهای دیگری که کمی بعد، در عصر راه‌اندازی صنعت در اروپا و امریکای شمالی، با سرعت کم و بیش زیادی رواج می‌یابند هنوز سخن نگفته‌ایم. در واقع این نوعی شکافت لایه‌ای بود نه گسستگی، که این جهش را در صنعت شیمی پدید آورد. پراتیکهای جدید، پایه‌های کهنی داشتند و آنها را نه اینکه ویران، بلکه برعکس، محکمتر کردند. دیده شد که چگونه سود لوبلان به سود صنایع معدن بود. گرچه صنعت اسید سولفوریک معمولی در فرجه‌ای از سی تا چهل سال به بالاترین مرحله تکامل خود دست یافت، صنعت اسید غلیظ، اسید بی‌آب یا اولتوم، آن‌طور که تا کنون آن را تعریف کرده‌اند در زندان روشهای سنتی، تا آغاز سده بیستم گرفتار بود و صنعت ساخت اسید نیتریک و کلریدریک، از تجهیزات مربوط به صنایع بزرگ، تا ربع سوم سده نوزدهم بی‌بهره ماندند. برای تهیه نمکهای معدنی، عاری از کربناتهای قلیایی باید گفت تا آنجا از روش تولید سنتی جدا شدند که رشته ساخت وسایل جدید به تولیدکنندگان این نمکها وسایل لازم برای پاسخگویی به نیازهای گسترده آنها را ارائه داشت و حتی آنها را تشویق کرد.

### کوره‌ها و روش گرم کردن آنها

در سراسر سده نوزدهم، کوره و دیگ دو وسیله اصلی برای همه شاخه‌های صنعت شیمی بودند. روش گرم کردن، برحسب مورد، با آهستگی تغییر یافته است. دلمشغولی پیوسته شیمیدانها این بود که تماس شعله با کف کوره، کف و جدار دیگ بهتر شود. آتشدان از پهلوی جابه‌جا یا پایین آورده شده بود. گازهای سوختی، معمولاً همراه با مقدار زیادی هوای اضافی، گرما را منتقل می‌کردند. این گرما بوسیله طاقی منعکس می‌شد یا دودکشی آنها را انتقال می‌داد. کوره بازتابی در سده هجدهم، رواج چندانی نداشت اما تهیه کربنات دو سود بروش لوبلان،

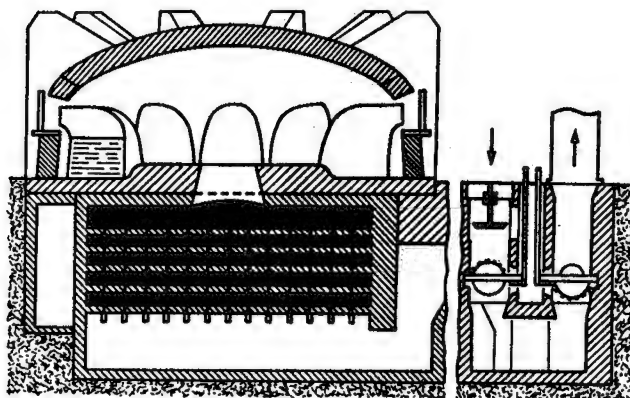
این کوره را برای مواقعی که یک فراورده باید بدون تحمل مرحلهٔ تکلیس، برای تشویهٔ مخلوطهای جامد بشدت گرم شود به‌طور وسیعی رواج داد. این شرط که در یکی از فازهای روش لوبلان وجود دارد، برای بسیاری از نمکهای دیگر هم که با تجزیهٔ مضاعف در حالت خشک به‌دست می‌آیند لازم است؛ از جمله دی‌کرمات سدیم که صنعت ساخت رنگهای سنتزی از سال ۱۸۸۰ بدان نیاز داشته است. اصل بازتابانیدن بوسیله طاقی از مصالح ساختمانی، با شکلهای گوناگون در موقعیتهای زیادی به‌کار گرفته شده بود، از جمله برای پخت ظروف سفالی.

### شیشه‌پزی و سفالگری

انواع تازهٔ کوره‌ها: تنوع شکلهای و مکانیسم طراحی شده برای کوره‌های شیشه‌پزی و سفالگری، راهی را نمایان می‌سازد که یک صنعت بسیار کهن، در سایهٔ تکنیک ساخت کوره‌ها، کاملاً نو شده است، انواع تازهٔ کوره‌ها معمولاً بسیار پیشرفته بودند، مانند کوره‌های شیشه‌پزی، که آقای زیمنس تکنیکی ابتکاری برای گرم کردن آن به‌کار برده بود (شکل ۱)، و در همان دوران در رشته‌های گوناگونی آن را آزمایش کرد. اما گاهی هم آنها ثمرهٔ طرحهای بسیار ساده‌ای بودند که کورهٔ حلقوی هوفمان (شکل ۲)، برای پخت آجر، نمونهٔ خوبی از آنهاست. با ترکیب ساده‌ای از دریچه‌ها و دهانه‌های متحرک، ورود و خروج هوا را در فضای یک حجره از یک راهروی حلقوی جابه‌جا می‌کنند تا هوای تازه، پیوسته روی انبوه آجرهای گرمی که به انتهای پخت رسیده‌اند وارد شود. هوا، بدین‌ترتیب پیش از رسیدن به بخش تونل، با تماس با آجرها، گرم می‌شود و در تونل با سوخت مخلوط می‌شود و پخت انبوه دیگری از خشته‌ها را شروع می‌کند. آقای هوفمان با بهتر کردن چرخهٔ هوا با وسایل بسیار ساده، نوعی کورهٔ گردان اختراع کرد که ساکن ماند.

کوره‌های پخت شیشه، مکانیسم دیگری داشتند، که بستگی به این داشت که گرم کردن با زغال‌سنگ یا چوب انجام گیرد، یا اینکه می‌خواهند لیوان و استکان بسازند یا شیشه جام. خود مبانی ساخت این قطعات، از زمان آغاز صنعت شیشه‌سازی، تقریباً هیچ تغییری نکرده بودند. با دمیدن در نی کار را شروع می‌کردند، سپس کارهای سنتی و گوناگون شکلهای انجام می‌گرفت. دربارهٔ خود کوره باید گفت که در مدتی بیش از بیست سال، در فرانسه، انواع کوره‌هایی که آقای دارتیگ<sup>۱</sup> در آغاز این سده طرح کرده بود رواج داشتند. بوته‌ها یا در یک ردیف در کوره‌های مکعب مستطیلی، یا حلقه‌وار در کوره‌های مدور، روی سکویی از خاک، گذاشته می‌شدند و در میان آن دریچهٔ ورود آتش، برای سوخت زغال‌سنگی، یا یک چاله عمودی برای سوخت چوبی وجود داشت

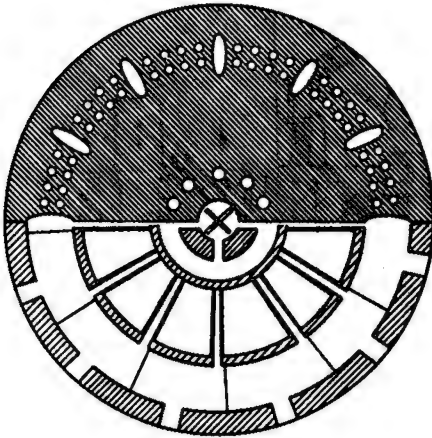
1. Dartigue



شکل ۱. کوره شیشه‌پزی زیرمنس.

قسمت بالا، شامل: کف کوره، سکویی که بوت‌ها را روی آن می‌گذارند، حلقه همراه یک دهانه در برابر هر بوت و گنبد کوره. در زیر کف کوره، تبادلهای گرم‌گذاشته شده‌اند که در اثر هوا یا گازهای سوختی، می‌توانند از این یا از آن طرف گذاشته شده باشند. در سمت راست، ورود گازهای گازساز که از تبادلهای می‌گذرند که با گازهای سوختی که به‌سوی دودکش (کاملاً در راست) جریان دارند، قبلاً گرم شده است. گازهایی که بدین ترتیب گرم شده‌اند در داخل کوره، با هوای گرم تبادلهای دوم برخورد دارند و می‌سوزند. در سمت راست، نمای مجرای ورودی و دودکش گازها از روبه‌رو دیده می‌شوند. در سمت چپ، مقطع کوره با نمای یک تبادلهای گرم‌گذاشته دیده می‌شوند.

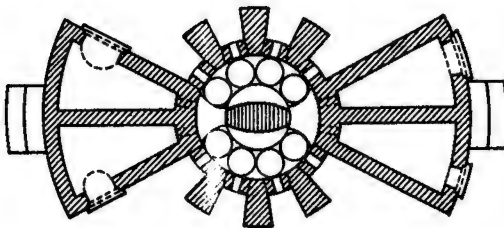
(شکل ۳). این کوره یک گنبد سوراخدار - و در صورت سوخت زغال سنگ - دودکشهایی با کشش به سوی طاقها داشت تا گرما بازیابی شود. دهانه‌ها روبه‌روی هر بوت بودند. سوخت زغال سنگ روی پنجره هر آتشدان، که در سطح پایتتری از کف بود، در اثر دستکاری دیواره‌های آتشدان، گازی شدن جزئی زغال سنگ ممکن می‌شد، و گاز در بالای آتشدان می‌سوخت (شکل ۴). این دستکاری دیواره‌ها الهامبخش گازسازهای زیرمنس بود، و از تحمل هزینه نسبتاً گزاف برای ساختن وسایل، وی را معاف کرد. اما این کار امکان استفاده از مزیت اساسی روشهای گرم‌سازی زیرمنس را از بین می‌برد. طی سالهای ۱۸۶۰ این روشها برای کوره‌های پخت شیشه به‌کار گرفته می‌شدند. خود برادران زیرمنس نمونه‌های گوناگونی از این کوره‌ها، برپایه اصل اختراعی خود، گازساز و دستگاههای بازیابی گرما طرح کردند که بعداً آنها را مورد بحث قرار خواهیم داد (رجوع کنید به صفحه ۶۲۲).



شکل ۲. کوره حلقه‌ای آجرپزی هوفمان.

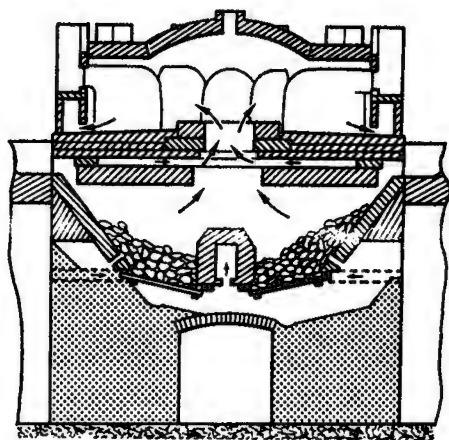
در اطراف کوره، دریچه‌هایی برای بارزنی و تخلیه آجرها وجود دارند و در ضمن ورود و خروج هوا را ممکن می‌سازند. در وسط دودکش کوره دیده می‌شود.

شیشه‌های قالبی و شیشه‌های آبداده: این تغییر بنیادی گرم کردن کوره‌ها، که به شکل ابتدایی انجام گرفته بود و در حدود سال ۱۹۰۰ کامل شد، هیچ تأثیری بر روش ساخت قطعات نداشت. در ساخت لیوان و ظروف شیشه‌ای، تنها دو نوآوری مؤثر بودند: قالبگیری و آبدادن. کار قالبگیری به دمیدن در شیشه پایان داد و با این کار نقش و نگارهای برجسته‌ای روی قطعه شیشه‌ای ایجاد



شکل ۳. کوره حلقوی دارتیگ برای پخت شیشه.

در وسط، پنجره آتشدان دیده می‌شود. هشت بوته حلقه‌وار ردیف شده‌اند؛ در برابر هر کدام، سوراخی برای بارگیری وجود دارد. در دو طرف کوره، قوسهای دود دیده می‌شود.



شکل ۴. کورهٔ حلقوی بئوتوس برای پخت شیشه. در پایین، یک گازساز با ورودیهای جانبی هوا.

می‌شد. بعداً این کار روشی برای ساخت ظروف توگود، با دمیدن در دهانه، یا اشیاء توپر، مثلاً دستهٔ چاقو شد. در هر بخش قالب، به علت بار اضافی، هواکشهایی گذاشته می‌شد. در آغاز سدهٔ بیستم، ساخت ماشینهای قالبگیری مجهز به دم مکانیکی شروع شد.

کار آب دادن شیشه، بار اول بوسیلهٔ آقای لا باستی<sup>۱</sup> در کریستال‌سازی شوازی در سال ۱۸۷۵ انجام گرفت. این مبتکر در اثر خواص اشکهای باتاوی<sup>۲</sup> که مدتهای زیاد حس کنجکاوی تماشاگران را تحریک می‌کرد، بدین کار راهنمایی شد. وی وسیلهٔ تنظیم همهٔ شرایط دقیق آبدادن شیشهٔ گرم در حمامهای روغنی را یافت. اما او در محاسبات خود اشتباه کرده بود و در اواخر سده، کارهایش بسیار محدود بودند. وی این کار را بعدها، بویژه برای آینه‌های بزرگ انجام می‌داد. روش تولید آینه‌های ریخته‌گری شده، طی سدهٔ نوزدهم عملاً تغییری نیافت. تنها چند اصلاح کوچک در ساخت جنس آن به عمل آمد و بقیه کارها، همان‌طور مشابه آنچه که در نیمهٔ دوم سده پیش انجام می‌گرفت، ادامه یافت.

پیشرفتهای بسیار چشمگیر در شیشه‌گری، از جنبهٔ شیمیایی آن بوده است. فرمولهای مخلوطها و بویژه طبیعت دقیق ترکیبات چنان بخوبی استقرار یافته بودند که شیشه‌گران می‌توانستند مواد خامی

1. La Bastie

۲. منظور قطره‌ای از شیشهٔ ذوب کرده است که نوک خیلی تیز دارد و با چکانهٔ شیشهٔ مذاب در آب سرد تولید می‌شود. باتاوی: نامی است که فرانسویان پس از تصرف هلند در ۱۷۹۵ به آن سرزمین دادند. - م.

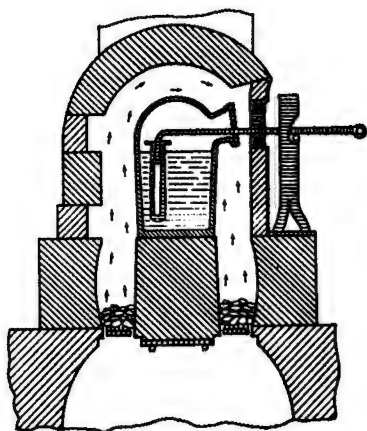
با ترکیب و خواص ثابت به کار گیرند. آنها انواعی از شیشه‌های بسیار گوناگون یا اجسام زجاجی وارد تجارت کردند که بعضی از آنها بدلهای موفقی از جواهرات بودند، از آن جمله می‌توان از strass ساخت آقای ی. اشتراسر<sup>۱</sup> ساکن وین نام برد.

شیشه‌های اپتیک: شیشه به یاری اطلاعات جدید شیمی به ماده‌ای پاسخگوی نیازهای گوناگون تبدیل شد. در نیمه نخست سده نوزدهم، شیشه بوهم، که اصولاً از کوارتز، کربنات پتاسیم و آهک زنده ساخته شده بود در آزمایشگاه‌های شیمی رواج کلی یافت. اما، ساخت شیشه‌های اپتیک بیشترین ترقی را داشته است. ترکیب شیشه کراون و نیز فلینت که برای ساختن عدسیهای بیرنگ لازم بودند شانه به شانه هم پیش می‌رفتند و گرچه چند نوع از آن را تولیدکنندگان مختلف پذیرفتند، همگی آنها امکان می‌دادند که به فرآورده‌هایی با خاصیت اپتیکی ثابت دست یابند. شیشه کراون برپایه شن، پتاس، سود و گچ بود و شیشه فلینت از شن، سرنج ( $Pb_2O_2$ ) و کربنات پتاسیم؛ و نسبت سرنج در آن بسیار بیشتر از کریستال بود.

ساخت شیشه کراون بسیار آسان بود. اما شیشه فلینت ساخت دشواری داشت و حدود یک سده بعد، آقای جان دالند انگلیسی در سال ۱۷۵۵ توانست تولید عدسیهای بیرنگ را به مرحله بازرگانی برساند. برتری انگلیسیها در اواخر سده هجدهم از بین رفت. شیشه فلینت در آغاز سده نوزدهم در آلمان ساخته شد اما نتوانستند ثبات خواص آن را تأمین کنند. سرانجام آقای گینان سویسی، سازنده ابزار دقیق، که چند سال نزد آقای فراونهوفر فیزیکدان و ابزارساز کار کرده بود، ریزه‌کاریهایی برای ساخت آن یافت که از آن جمله همزدن ذوب شده آن بود؛ و نیز آقای بونتان فرانسوی شیشه‌گر، که به نتایج کارهای گینان آشنا شده بود توانست تولید عدسی را به‌طور قطعی، صنعتی کند. اصولاً لازم است که گرم کردن، منظم و در کوره‌ای انجام شود که شعله‌های آن بوته را به‌طور کامل فرا گیرد (شکل ۵). نخست بوته را تا سرحد سفید شدن گرم می‌کنند سپس آن را در کوره می‌گذارند. بوته زمانی که در جای خود قرار گرفت مواد خام را به‌طور لقمه یک کیلوگرمی در هر ساعت بدان می‌افزایند.

در پایان عملیات، پس از چهارده ساعت مجموع گرم کردن، هر ساعت به ساعت، با یک همزن، که هنوز نام گینان بر خود دارد آن را به هم می‌زنند. این همزن، استوانه طویلی از خاک نسوز است که آن را نیز قبلاً گرم کرده‌اند. عملیات با گرم کردن پایانی به مدت دو ساعت، تمام می‌شود، بوته را با زغال سنگ می‌پوشانند. زغال سنگ تقطیر می‌شود و گازها در زیر طاق کوره می‌سوزند.

روشن است که شکل کوره و هدایت گرما در این تولید اهمیت دارند. آقای بونتان از این روش



شکل ۵. کوره ساخت شیشه فلینت در بوت. همزنی که جرم مذاب را در بوتۀ منظمأ به هم می‌زند، نام گینان را حفظ کرده است.

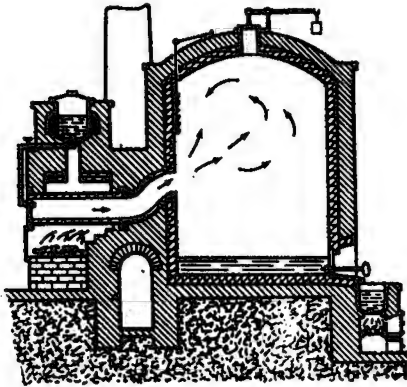
برای تهیه شیشه کراون در کارخانه خود در شوازی استفاده کرده است. تولید منظم شیشه کراون و فلینت اپتیکی در تعداد زیادی از رشته‌ها: دستگاههای علمی، دریانوردی، مکانیک ابزار دقیق، مؤثر بوده است.

## گوگرد و پیریتها

صنایع سرامیک و شیشه‌گری بی‌شبهه از صنایعی هستند که علاوه بر عمل آوردن کانیها در استخراج فلزات، انگیزه تجربیات بسیار پیشرس در رشته گرم کردن صنعتی بوده‌اند. از همان آغاز تولید سود لوبلان، و تأثیری که در پیدایش صنعت بزرگ معدن داشت، این پیشه آتشکاری می‌بایست با همه تولیدهایی که در سده نوزدهم عناصر بسیار گوناگون صنایع سود را تشکیل می‌دادند، سازگار شود. در این رشته‌های تولیدی، نخستین مرحله، تهیه گوگرد بود، نخست برای اینکه در اطاق سربی سوزانیده شود، سپس در کوره‌های ویژه‌ای برای تهیه مخلوط گاز سولفور و بخارهای نیترو، تا به اطاق سربی، که پیوسته در کار است فرستاده شوند.

استخراج گوگرد: در اوایل این سده، گوگرد در همان محل معدن تهیه می‌شد، و برای این کار از روش ابتدایی توده کردن آن در یک شیب استفاده می‌شد. این کوره سرباز را مشتعل می‌کردند، سوخت آن همان خود گوگرد بود و با گرمای برخاسته از سوختن آن، بخشهای دیگر گوگرد ذوب می‌شدند.





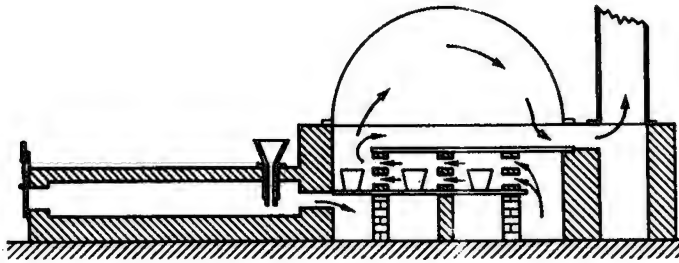
شکل ۶. کوره میشل برای خالص کردن گوگرد.

گوگرد در یک دیگ بالا، در قسمت چپ شکل ذوب شده است. گوگرد مذاب در قرع، که در زیر دیگ قرار دارد وارد می شود و در آنجا تقطیر می گردد. در قسمت راست شکل، اطاق بزرگ میعان و ساخته شدن گل گوگرد است.

بدین ترتیب، از همان آغاز، طرح کوره های حقیقی، که خمره های سرامیکی یا استوانه های فلزی را در آنها می چیدند ارائه شده بود. استخراج گوگرد با جریان یافتن آن یا تقطیر انجام می گرفت. این روش در نیمه دوم سده نوزدهم، با گرم کردن گوگردها با بخار آب، به جای سوزاندن بخشی از گوگرد، بهتر شد.

برای خالص کردن گوگرد، از تقطیر استفاده شد. در سال ۱۸۱۵ برای این کار، کوره ای طرح شد که در بخشی از آن نخست ذوب و سپس تقطیر عملی می شد؛ بعد در بخش دیگر آن کوره، تبدیل گوگرد تصعیدی به گل گوگرد یا به گوگرد مایع که به شکل قلم یا باتون ریخته گری می شد انجام می گرفت (شکل ۶). در این کوره که ابتکار یک صنعتگر اهل ماریسی به نام میشل بود گویا صرفه جویی به شکل جدید برای نخستین بار در آن رعایت شده بود. کوره های تولید مصالح ساختمانی، پیش از آنکه در آنها گازساز و تبادلهای گرما به کار برده شوند با همین دید ساخته می شدند.

برای بیرون کشیدن گوگرد از پیریتها بروش تکلیس، کوره های نوع دیگری هم طراحی شدند. عملیات در قرعهایی که بالای آتشدان کوره دارای طاق نیمگرد گذاشته می شدند انجام می گرفت. تجربه کوره های پخت آهک، که سابقه ای بس طولانی دارند، برای ساخت کوره های پخت پیریت مورد استفاده قرار گرفت. تکلیس پیریتها تنها در مناطق دور افتاده دارای رگه های گوگرد طبیعی



شکل ۷. کوره تهیه گاز سولفور؛ هریسون - بل ایر

بارزنی کوره از راه قیف بالایی در ظرف سمت چپ انجام می‌گیرد و گوگرد در آنجا می‌سوزد. عمل احتراق در آتشدان سمت راست پایان می‌گیرد؛ بخارها از روی دیگهای محتوی نیترات می‌گذرند.

به‌کار گرفته می‌شد.

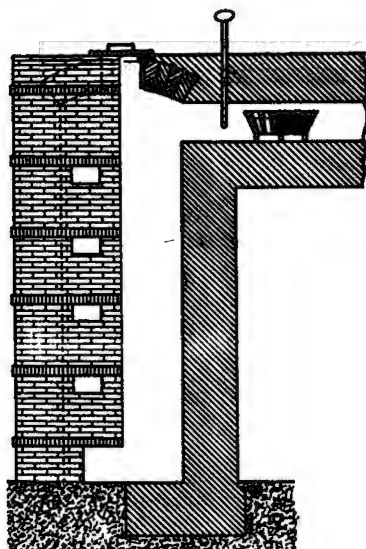
در ربع دوم سده نوزدهم، کاربرد کوره‌ها برای سوخت گوگرد مخلوط با نیترات، جهت تغذیه پیوسته اطاق سربی آغاز شد (شکل ۷). نخستین نمونه‌های این کوره‌ها دارای کفی بودند که یک ظرف چدنی بر از مخلوط فوق را در آن سر می‌دادند تا محتوی آن بسوزد. در این روش، ردیفی از کوره‌ها لازم بود تا تغذیه پیوسته اطاق تأمین شود. طی ۲۵ یا ۳۰ سال، کوره‌هایی با سوخت گوگرد طرح شدند که می‌توانستند پیوسته کار کنند و در آنها گوگرد تصعید شده پیش از آنکه گازها به اطاق برسند، نشت می‌کرد، یا اینکه برای تکمیل سوخت به‌کار برده می‌شد. تشویه پیریتها: برای تهیه مستقیم گاز سولفور از پیریتها بروش تشویه آنها، کارگاههای متعددی در فرانسه و آلمان در آغاز سده نوزدهم تلاش کردند. اما اشتعال این مواد دشوار بود و نیز تولید گازهای محتوی ناخالصیهای مزاحم از معایب آن شمرده می‌شد. با این حال، تشویه پیریتهای مس، مرحله‌ای از استخراج مس از کانیهای گوگردی آن می‌باشد. همچنین زمانی که تولید اسید سولفوریک در حال تبدیل به یک صنعت مهم بود، صنعتگران متعددی مسأله استفاده از گازهای سولفوروی تشویه را بررسی می‌کردند. در فرانسه، امتیاز آقای میشل پره که در سال ۱۸۳۵ به ثبت رسید معاصر آغاز کاربرد همین روش در اتریش بود که آقای ی. برم<sup>۱</sup> آن را مستقلاً اندیشیده بود.

این روش رواج نیافت؛ زیرا در همه صنایع، ثبات روشها، به‌طور کلی تجهیزات، سنت شده بود مگر اینکه به تغییر آن ناچار باشند. اما به‌دنبال انحصاری که توسط مؤسسات ته<sup>۲</sup> در ماریسی مورد صادرات گوگرد سیسیل در سال ۱۸۳۸ ایجاد شده بود، بهای این فراورده یکباره سه برابر شد

و نوآوریهای تشویه، به کار گرفته شدند. کاربرد گازهای سولفور پیریت در ۱۸۳۹ در انگلستان و در ۱۸۴۰ در آلمان متداول شد. بعداً این کار بسرعت تعمیم یافت و بهای گوگرد، با اینکه انحصار مؤسسات ته از بین رفته بود، به علت کاربرد آن در مداوای موستانهای کشورهای مدیترانه‌ای که در اثر سفیدک مو خراب شده بودند، کاهش نیافت. اما خسارت آن چنان زیاد هم نبود و در نتیجه، هم مقدار مصرف گوگرد و هم بهای آن کاهش یافت. بدین ترتیب دوره کوتاهی از شک و تردید درباره آینده هر دو روش تهیه گازهای گوگرد ایجاد شد. اما در پایان سالهای ۱۸۶۰ تشویه پیریت‌های مس و آهن به طور قطعی از بین رفت.

رگه‌های تازه‌ای استخراج و رگه‌های قدیمی از نو سودآور شدند؛ مثلاً معدن سن بل<sup>۱</sup> نزدیک لیون، که می‌بایست زمانی که آقای پره کاربرد تازه‌ای برای پیریت‌ها یافت، متروکه شده باشد. مؤسسه‌ای که در آن زمان به مدیریت فرزندان وی بود در سال ۱۸۷۱ در شرکت سن گوبن، شونی<sup>۲</sup> و سیری<sup>۳</sup> ادغام شد. در آن زمان گمان داشتند که این رگه می‌تواند حتی تا یک سده هم سودآور باشد. در این دوره، پیشینی که سلف شرکت مرل<sup>۴</sup>، نخستین تولیدکننده آلومینیم با روش شیمیایی آقای هانری ست-کلر-دوویل بود، استفاده‌کننده اصلی رگه‌های موجود در مناطق گار و آردش بود که تولید آنها همراه با تولیدهای رون،  $\frac{9}{10}$  مصرف فرانسه را تأمین می‌کردند. در اروپا، فرانسه در استفاده از پیریت‌های مس و آهن مقام نخست را داشت. از سال ۱۸۶۴ تا ۱۸۷۴ مقدار تولید ملی آن از ۹۰۴۰۰ به بیش از ۲۱۰۰۰۰ تن رسید. آلمان، در مقام دوم، تولید آن از ۳۲۰۰۰ به ۱۲۸۰۰۰ تن رسید. انگلستان که بزرگترین مصرف‌کننده این ماده بود در همان سالها از ۱۷۰۰۰۰ در سال ۱۸۷۴ به ۵۵۴۰۰۰ تن دست یافت. واردات آن از پرتغال، سومین کشور تولیدکننده، اسپانیا، آلمان و نروژ بود. سوئد در منطقه فالون<sup>۵</sup> رگه‌هایی از این کانی داشت که قابل توجه به‌شمار می‌آمدند.

کوره‌های جریانی: زمانی که روش تشویه برای تهیه  $SO_2$  به کار گرفته شد نمونه‌های متعددی از کوره‌ها بسرعت ساخته شدند. تشویه پیریت‌ها برای تهیه گاز سولفور جهت تولید اسید سولفوریک، کار بسیار ظریفی بود. نتیجه کار بستگی به کمیت کانی‌هایی داشت که در کوره بار زده می‌شدند و نیز نحوه سوختن گوگرد و جاری شدن مواد تشویه شده و بالاخره کشش هوایی که وارد کوره می‌شد. چنین می‌نماید که شکست نخستین آزمایشگرانی نظیر کلمان دزورم به علت اضافی بودن هوایی بود که بدرون کوره خود می‌دمیدند. تنها پس از چند آزمایش کورکورانه بود که آقای میشل پره و همکار وی اولیویه اظهار داشتند که بازده اسید در اطاقها، اگر ورود هوا در کوره سوخت پیریت، کمتر باشد بالا خواهد رفت، و درحین عملیات نیز باید مقدار ورود هوا با شرایط مرحله‌ای کار تطبیق

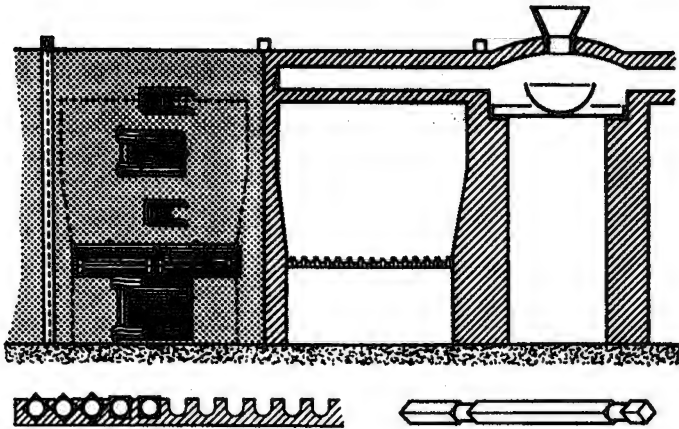


شکل ۸. کوره جریانی برای تشویه پیرتها.

کانیها از بالا در کوره ریخته می‌شوند. آتشدان در پایین آنها را می‌سوزاند. گازها درحین فرار از یک مجرای مستقیم از دیگ محتوی نیترات می‌گذرند. از سوراخهای دیوار هوا وارد کوره می‌شود و کانیهای کلوخه شده را سیخ می‌زنند

داده شود. عوامل متعدد دیگری نیز در نتیجه تشویه مؤثر هستند. برای رفع مشکلات متعددی که با آنها روبه‌رو می‌شدند راه‌حلهایی پیاپی ارائه می‌شد.

آقای پره در اوایل کار، پیرتھای کلوخه‌ای را تشویه می‌کرد و کوره وی به‌طور ساده براساس مدلی از کوره‌های آه‌کپزی بدون پنجره، از نوع کوره‌های عمودی جریانی ساخته شده بود که شکل داخلی آن شباهت زیادی به کوره‌های بلند داشت. در انگلستان نمونه نخست، کوره‌ای با دو آتشدان روی یکدیگر بود که در آتشدان پایین، خاکستر و نخاله‌هایی که از پنجره آتشدان بالایی پایین می‌ریختند سوختشان ادامه می‌یافت. هر دو شکل کوره رضایتبخش نبودند برای ساختن نمونه‌های فراوان دیگری از کوره‌های جریانی، یعنی کوره‌های عمودی با دیواره قائم یا مایل کوشش شد که مقطع آنها از بالا به پایین تنگ می‌شد یا نمی‌شد و دارای سوراخهای با فاصله معینی در دیوار بودند تا بتوان بار کوره را جابه‌جا کرد، (شکل ۸). پایین کوره که پنجره‌ای نداشت با یک لبه عمودی، دو بخش



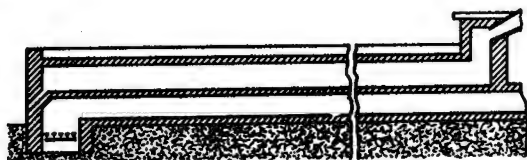
شکل ۹. کوره پنجره‌ای برای تشویه پیریتها.

در سمت چپ، نمای کوره، از روبه‌رو از پایین به بالا به ترتیب: دریچه آتشدان، دریچه برای گرداندن میله‌های پنجره، روزنه دید، دهانه بارزنی و روزنه دید. در سمت راست، برش عرضی کوره عمود بر نما بخارها از روی قفس نیترات مستقیماً فرار می‌کنند. در پایین، جزئیات پنجره با میله‌های گردان، و یک میله انتهایی نشان داده شده است.

شده بود. کانیها را از دهانه بالا به شکل لقمه‌هایی وارد کوره می‌کردند و توده تشویه شده در پایین، جدا و از دو سوراخ جانبی خارج می‌شد. در فرانسه و انگلستان این نوع کوره در چندین نوع ساخته شدند. اما در همان حال هم کوره‌های پنجره‌دار، باقی ماندند.

کوره‌های پنجره‌دار: سرانجام کوره پنجره‌دار برای درمان سنگهای معدنی که فراورده تشویه آنها به اندازه گازهای سولفورو اهمیت داشتند برگزیده شدند. انگلیسیها ادعا دارند که بهترین نسبت و بهترین ساختمان را برای این کوره یافته‌اند (شکل ۹): سه دیوار متمایل از چهار دیوار، توأم شدن دو کوره که پشت به یکدیگر داده‌اند، طاق با رگه‌های طولی که مرکز آن روی دیواره مشترک تکیه دارد. دهانه کوره روی دیواره جلویی بود و گازها در یک گردآور ته‌نشین‌کننده غبار جمع می‌شدند. این گازها پیش از خروج، از قفس نیترات می‌گذشتند و در آنجا سولفات تشکیل می‌شد و بخارهای ازت آزاد می‌شد تا با گازهای سولفورو مخلوط و به اطاقهای سربی فرستاده شوند.

وسایل متعددی در جریان سی سال پژوهش ساخته شد که رفته‌رفته در همه کوره‌های درمان شیمیایی و حتی گرم‌سازی صنعتی به‌کار گرفته شدند. آتشدان با پنجره گردان که از مدتها پیش

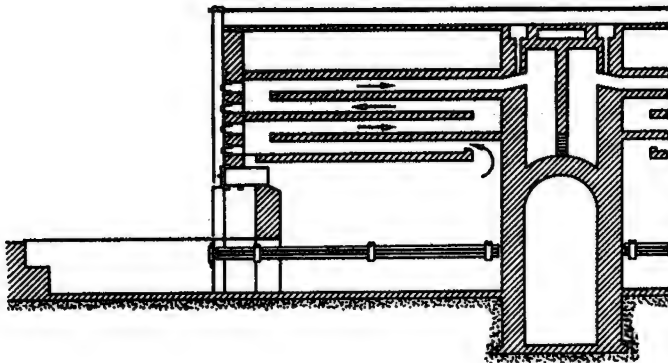


شکل ۱۰. کوره اسپنسر برای تشویه پیریت غباری.  
در پایین، آتشدان بازتابی؛ در بالا، اطاق تشویه. این نوع کوره، ۱۲ متر طول و ۲ متر عرض دارد.

آقای پره طرحریزی کرده بود. میله‌ها از چدن با مقطع مربعی بودند و در دو سر آنها شکافهایی استوانه‌ای بود که در راده‌های دایره‌ای خرکهای طولی جفت می‌شدند. حرکت آنها بواسطه دسته‌ای بود که یک کارگر متناوباً روی انتهای هر میله درگیر می‌کرد و آن را با دست می‌گردانید. این وسیله عملیات بسیار وقتگیر و دشوار آخالگیری را حذف می‌کرد. سرانجام، برای مؤسسات بزرگ گودال بسیار عمیقی می‌کنند تا بتوانند با واگنی که روی ریل حرکت می‌کرد خاکستر کوره را در آنجا تخلیه کنند.

کوره‌های کفی و تشویه غباری: پیریت‌های بعضی از رگه‌ها، شکننده‌تر از آن هستند که بتوانند به شکل گرد یا دانه‌های ریز تشویه شوند. کوره‌هایی مخصوص برای تشویه آنها ساخته شدند (شکل ۱۰). نمونه‌های نخستین این کوره‌ها، از نوع موفلی (آستردار) افقی با طول ۱۵ تا ۳۰ متر بودند. آتشدان آنها با زغال سنگ می‌سوخت، اما از نظر ایجاد آلودگی محیط چنان وحشتناک بودند که کاربرد آنها ممنوع اعلام شد. صنعتگران نیز بدلیل دشواری اداره، از ساخت آن صرف‌نظر کردند.

باز باید از آقایان پره و اولیویه نام برد که پس از چند آزمایش، کوره چند طبقه را طرحریزی کردند. کفهای این طبقات پیچ و خم‌دار بودند به طوری که گازهای گرمی که از آتشدان متصاعد می‌شدند با لایه‌های نازکی از پیریت با ضخامت تنها چند سانتیمتر تماس می‌یافتند و آنها را مشتعل می‌ساختند. از راه سوراخهای جانبی، با سیخی، باقیمانده غبار تشویه شده را در خاکستردانی می‌ریختند سپس غبارهای کفهای بالا را یک طبقه پایین می‌آوردند. بارزنی این کوره از مواد خام تنها روی بالاترین کف انجام می‌گرفت. آتشدان، پنجره‌ای از میله‌های گردان داشت و با کلوخه‌هایی از پیریت تغذیه می‌شد. این نوع کوره‌ها را بنابرین، مختلط می‌نامیدند. کوره ساخت آقایان اولیویه و پره با یک مجرای بزرگ جانبی تکمیل شد که طاقچه‌ای برای نیترات داشت (شکل ۱۱). گردوغبارگیری گازها با گذراندن از یک دهلیز طویل که در زیر این مجرا بود و گازهای هر دو کوره مشترک را دریافت می‌کرد، انجام می‌گرفت. این سیستم چند سال بعد بوسیله آقای یوهل مدیر کارخانه مالترا تکمیل

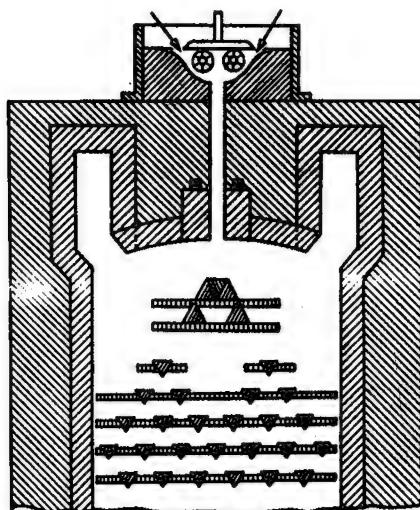


شکل ۱۱. کوره اولیویه - پره برای تشویه پیریت.

دو کوره به اطاقهای غبارگیری از گازها راه دارند. کلوخه‌های پیریت روی پنجره آتشدان در پایین، می‌سوزند. کلوخه‌ها از دهانه بزرگ کوره، واقع در دیوار سمت چپ، بدرون آن ریخته می‌شوند. خاکه پیریتها از بالا در کوره ریخته می‌شود و توسط سوراخهای مربوطه واقع در دیوار سمت چپ از بالا به پایین روی کف کوره رانده می‌شود. خاکستر آنها در خاکستردان، سمت چپ، ریخته می‌شود. گازها و هوا در جهت مخالف پیش می‌روند.

شد. این نوع کوره با نام مالتر با سرعت در تقریباً همه کشورهای، پس از به نمایش گذاردن آن در نمایشگاه سال ۱۸۷۳ وین پذیرفته شد؛ تا این تاریخ مکانیسم این کوره محرمانه بود، آرایش کلی و جزئیات آن را نمی‌شد به ثبت رسانید. کوره مالتر به شکل ردیفی از چهار کوره پهلوی هم ساخته می‌شد که یک اطاق غبارگیری مشترک داشتند. آتشدان پیوسته‌ای نداشت و آن را برای راه‌انداختن گرم می‌کردند و پیریت‌های بارزده شده در گرما مشتعل می‌شدند، آن‌گاه پیوسته کار می‌کرد، جابه‌جا کردن مواد در داخل کوره با دست بود. تفاوت‌های آن با کوره اولیویه - پره در چند مسأله جزئی بود که بخصوص مربوط به مکانیسم بارزدن و کشش هوا می‌شد که تنها پس از آزمایش اساسی کار کوره‌ها عموماً و نیز نوعی آزمایشگری پراگماتیکی موشکافانه برطرف شدند.

عملگران دیگری در همین دوره کوره‌هایی طرح کردند که جابه‌جا شدن پیریت در آنها در اثر وزن به طور خودکار انجام می‌گرفت. آنها به‌طور کلی از اصل کوره‌های چند طبقه پیروی کردند؛ کفهای این طبقات متناوباً نسبت به یکدیگر شیب متقابل داشتند به‌طوری که بار درون کوره که از دهانه بالا ریخته می‌شد ضمن سرخوردن به پایین با جریان هوای گرم و بالا رونده آتشدان، در جهت مقابل، برخورد می‌کرد. همین آتشدان چندین کوره متقابل را تغذیه می‌کرد. در مدل دیگری که مزایا

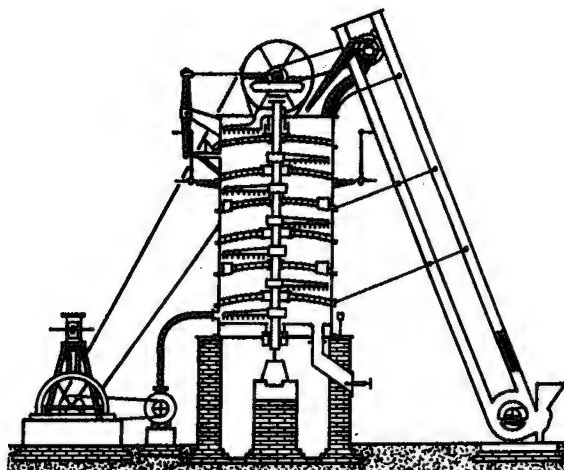


شکل ۱۲. سقف کوره گرسن هوفر برای تشویه بیریتها.  
کوره با کار پیوسته؛ در بالا، سیستم خودکار بارزنی، بیریتها، بر روی همه دهانه کوره تقسیم شده‌اند.

و معایب آن گفت‌وگوی سختی را برانگیخت، کوره گرسن هوفر<sup>۱</sup>، کفهای کوره با کاردانی جای خود را به نوعی بازی منشورهایی از گل نسوز داده بودند که با پیچ و خمهایی از بالا به پایین اطاق سوخت گذاشته می‌شدند (شکل ۱۲). نوعی از این کوره مجهز به سیستم بارزنی خودکار، از دو استوانه شیارداری تشکیل می‌شد که یک پیچ بی‌انتهای ماشین بخاری آن را فعال می‌ساخت، این دو استوانه را می‌گردانید. غبار بیریت که یک منشور واژگون زیر دهانه بارزنی، آن را توزیع می‌کرد، روی منشورهای طبقاتی به شکل کاسه‌هایی رسوب می‌کردند و بتدریج در اثر فشار بارهای بعدی و نیز تشویه پایین می‌افتادند تا در خاکستردان جای گیرند. وسایل درونی اطاق تشویه، دستخوش تغییرات زیادی بودند.

با همه این تحقیقات، بخوبی روشن است که دو نوع کوره‌ای که حدود سال ۱۸۸۰ بیش از سایرین رواج داشتند کوره‌های موفلی (آستردار)، از کوره‌های سنتی ارزان، و برای تأسیسات بزرگ، کوره چند طبقه مالتر بود.





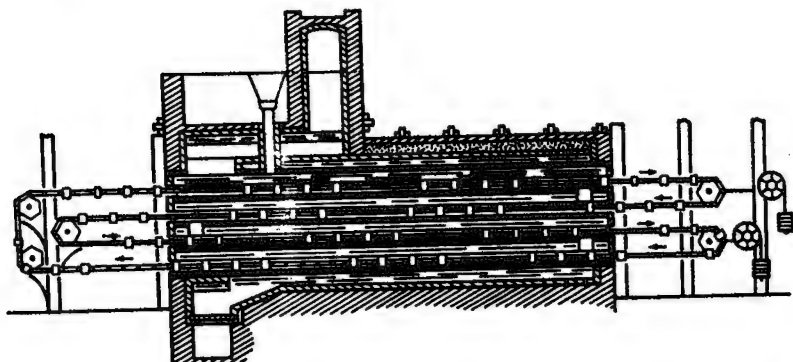
شکل ۱۳. کوره تشویه پیریت با همزن گردان، ساخته مک دوگال.

گنبد‌های طبقات متناوباً یک معبر مرکزی و یک معبر جانبی دارند. در سمت چپ، ماشین بخاری محور گردش همزن‌ها، دم و مکانیسم بارزنی (در سمت راست) را فعال می‌سازد.

کوره‌های مکانیکی: در این دوره، نخستین کوره مکانیکی که ساختمان آن سراسر فلزی بود به توسط آقای مک دوگال<sup>۱</sup> طرح شد. این کوره با بی‌اعتنایی مواجه و تقریباً کنار گذاشته شد (شکل ۱۳). این کوره، یک استوانه بزرگ ساخته شده از حلقه‌های چدنی روی هم چیده و پیچ و مهره شده، بود. هریک از برجستگیهای داخلی، حامل کفی گنبدی شکل بود که روی آن یک تیغه دندانه‌دار می‌گردید. همه این تیغه‌ها روی یک محور عمودی نصب شده بودند و دندانه‌های آنها در جهات مقابل یکدیگر شیب داشتند تا پیریت در جریان تشویه به‌طور متناوب به طرف مرکز یا محیط کف کوره فرستاده شود تا به طبقه پایین راه یابد. این کوره را که در پایین، آتش‌دان پیوسته‌ای نداشت از پیش گرم می‌کردند تا پیریت‌های تشویه‌شونده مشتعل شوند. همه عملیات به‌طور مکانیکی انجام می‌گرفت و مصرف زغال ماشین بخار که بادبز، زنجیر بادزنی و محور عمودی را حرکت می‌داد با صرفه‌جویی در عده کارگران، جبران می‌شد. خوب کار کردن کوره در گرو مهارت کارگران نبود.

این کوره‌های مکانیکی که در آن زمان در صنعت شیمی به‌کار گرفته می‌شدند، به‌طور کلی استوانه‌هایی کمی مایل از حالت افقی بودند و حول محور خود می‌گردیدند. آنها همچون صنایع

1. Mac Dougall



شکل ۱۴. کوره موفلی تشویه پلند.

چهار موفل بر روی هم، بوسیله یک زنجیر بی‌پایان تیغه‌دار، متناوباً در جهات متقابل طی می‌شوند. در قسمت بالا، قیف بارگیری و دودکش دیده می‌شوند. در پایین، آتش‌دان و خاکستردان و در سمت راست، مکانیسم کشنده زنجیر است.

دیگری، که از گذشته سنتی طولی بر خودار بودند بدون هیچ‌گونه مخالفتی پذیرفته شدند. چنین می‌نماید که معاصران مزایای کوره پیریت مک دونالد را کم ارج نهادند و از آن خوششان نیامد. این حقیقتی است که با وجود کارهای شارل کومب، دمه‌ای صنعتی در پاسخگویی به همه نیازها بسیار ناتوان بودند. روش غبارگیری که شامل هدایت گازها در اطاقهای بزرگ بود برای کوره‌ای از این نوع و نیز کوره‌های دیگر کارآمد نبود و در ضمن، گاز پرغباری تولید می‌کرد.

کوره‌های مکانیکی با وجود نوعی محکومیت پیش از وقت، از دهه پایانی سده نوزدهم، تکثیر یافتند. اصل کوره مک دوگال در کارخانه‌ای واقع در ویسی‌مونتانی<sup>۱</sup> برای ذوب پلند (کانه روی) به‌کار گرفته شد. در ۱۸۹۴ آقای فراش در ممالک متحد آمریکا چنین کوره‌ای برپا داشت. حدود سال ۱۹۰۰ شرکت رنایا<sup>۲</sup> در کارخانه‌های خود در هارتس<sup>۳</sup> برای تشویه پلند، دستور ساخت کوره‌هایی با چهار موفل روی یکدیگر داد که یک زنجیر طولانی بی‌انتهای آنها که حامل تیغه‌هایی بود سراسر طول هریک از آنها را می‌پیمود (شکل ۱۴).

اطاق غبارگیری: حدود ده سال بعد، کوره‌های خودکار، تقریباً در همه‌جا بدلیل پیشرفتهایی که در ساختمان آنها ایجاد شده بود و باز بدین علت که ساختمان اطاقهای غبارگیر کوچک آن مجهز به وسایلی شده بود جانشین کوره‌های دیگر شدند. این نمونه یکبار دیگر نشان می‌دهد که امر نوآوری،

کار منفرد و ساده‌ای نیست. در این قضیه وسایل ساختمان مکانیکی، پیشرفته‌تر شده بودند و نیز تفکر طولانی روی طرح مجموعه‌های تشویه و غبارگیری، راه‌حلهای تازه‌ای را القا کرده بود. این گرایش که مدت نیم سده ادامه داشت در پی یافتن ترتیبات دیگری بود که دخل و تصرف در کیفیات گوناگون مواد خام را برحسب خواص مکانیکی ویژه آنها (شکنندگی)، درصد گوگرد و فلز و بالاخره محصول مورد نظر، ممکن سازد. چنین تحولی زمانی درک می‌شود که آن را در متن رشد صنایع شیمیایی، به‌طورکلی، قرار دهند، و اگر نتیجه چنین متنی است، عاملی از آن نیز هست و هر دو جنبه بستگی بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند.

### رواج کوره‌های مکانیکی

در همین اوان، کوره‌هایی که در سایر شاخه‌های صنایع شیمیایی، کاربردهای دیگری داشتند نیز چنین تحولی را تحمل کردند. در انگلستان کوره‌های با کف (مدور) گردان، و تیفه‌های ثابت حدود سالهای ۱۸۸۰ برای تولید سولفات سدیم، به تقلید از کوره‌ای که مدت چند سال در یک کارخانه متالورژی همین کشور که از بعضی کانیهای گوگردار بروش تشویه کلروری، مس به‌دست می‌آورد، به‌کار گرفته شدند. کار کردن این کوره خوشبختانه ساده بود؛ انتقال حرکت بوسیله محور و دنده واسطه‌ای انجام می‌گرفت که با یک چرخ دندانه‌داری که بر محور مرکزی کوره ثابت شده بود درگیر می‌شد. این مکانیسم، جانشین سیستم پیچیده زنجیر بی‌انتهای شده بود. کوره‌های دارای تیفه‌های گردنده، در اواخر سده نوزدهم برای تکلیس بی‌کربنات سدیم، در پایان تولید سود به طریق آمونیاکی به‌کار گرفته شدند.

کوره گردان، کوره گردان مایل در همان زمان در امریکا برای ساخت سیمان پورتلند به‌کار برده می‌شد. این نوع سیمان را نخستین بار آقای جوزف اسپدین<sup>۱</sup> در ۱۸۲۴ ساخت اما تولید صنعتی آن در سال ۱۸۵۰ آغاز شد. لازم بود که رسهای آهکی یا مخلوط رس و آهک را تا شروع شیشه‌ای شدن، تکلیس کرد. نمونه‌های متعددی از کوره‌هایی که تقلیدی از کوره‌های معروف برای این نوع تکلیس بودند به‌کار گرفته شدند. رایجترین آنها، کوره‌های استوانه‌ای با مصرف سوخت کم و دارای بارگیر، به شکلهای گوناگون بودند. این کوره‌ها گویا حلقه‌ای یا چند طبقه بودند. همه کارهایی که بادست انجام می‌گرفت در آنها مکانیکی بود. پس از سی سال پیشرفت آهسته، تقاضا برای این کوره‌ها بسرعت افزایش یافت؛ در نتیجه کوره‌های گردان رو به راه شدند. پس از امریکا، که تنها یک کارخانه استیگ ولی<sup>۲</sup> از شرکت اتلس سمت آن، با ۲۹ کوره از این نوع در سال ۱۸۹۹ فعالیت

داشت، این نوع کوره مکانیکی، حدود سال ۱۹۰۲ به انگلستان و از آنجا به اروپا وارد شد. نمونه دیگری از کوره‌های گردان برای تولید سولفات سدیم با اثر دادن اسید سولفوریک روی کلوروسدیم به‌کار گرفته شد. این زمانی بود که شیشه‌گری و بویژه آینه‌سازی شروع به استفاده از این سولفات به‌جای کربنات کرده بود. این کوره، یک استوانه افقی بود که روی چرخکهایی می‌گردید و یک محور طولی در داخل آن در جهت مخالف آن گردش داشت. پره‌هایی بدین محور متصل بودند تا بار را از یک سر کوره به سر دیگر آن برانند.

کوره‌های فلزی: فلز، که آهن یا چدن بود، به‌طور روزافزونی جای مصالح ساختمانی را می‌گرفت. مدت‌ها بود که فلز در ساخت کوره‌های شناخته شده برای چفت‌وبست آتشدها، روزه‌ها، دریچه‌های آدم‌رو به‌کار گرفته می‌شد، و حتی زمانی که فراورده‌ای که باید روی آن کار شود ممکن بود آجرها و گل نسوز را بسرعت خراب کند، بدنه کوره را از فلز می‌ساختند. اما نقش آن، تنها کمک به مصالح ساختمانی بود که کارگران مؤسسه، آنها را در محل تهیه می‌کردند و در نتیجه از هزینه کاسته می‌شد. کاربرد فلز مزایای دیگری هم داشت و آن رها نکردن نوع ساختمانهای کلاسیک، کوره‌های بازتابی و استوانه‌ای عمودی بود که به مدت تقریباً نیم سده دیگر به‌کار گرفته شدند. فلز، ساخت سریع مجموعه‌های بزرگ را ممکن ساخت؛ به دوام آنها افزود؛ نگاهداری آنها را ساده کرد؛ و تغییر بخشی از آن را، بدون نیاز به تجدید ساختمان کل آن، میسر ساخت. وانگهی انواعی از راه‌حلهای در دسترس قرار داد. می‌توانستند کل ساختار را تغییر دهند؛ بخشهای تکمیلی بدان بیفزایند تا میدان کاربرد این کوره‌های فلزی را برای تولیدهای تازه‌ای که در تعداد زیاد، در نیمه دوم سده نوزدهم از آزمایشگاه به کارخانه انتقال یافته بودند توسعه دهند یا اینکه کارایی یک وسیله سنتی را که دیگر از پاسخگویی به تقاضای روزافزون درمانده بود، بالا برند. وانگهی ساخت فلزی، شرط اساسی مکانیکی شدن کوره‌ها بود. نمی‌شد به کوره‌های گردانی اندیشید که بدون کاربرد فلز طرح یا ساخته شده باشند. نوآوریهای متعددی از این دوران، هنوز هم فعالیت دارند.

فراورده‌های آستری: سرانجام اهمیت انواع فراورده‌های آستری را برای حل مسائل برخاسته از ساختمان فلزی نباید ندیده گرفت. آجرهای نسوز معمولی طبعاً برای آستر کوره به‌کار گرفته می‌شدند. اما مصالح تازه‌ای با استفاده از کربنات منیزیم، پس از کارهای شلوزینگ در ۱۸۸۰، و کربنات دوگانه منیزیم و کلسیم، دولومیت، از نام کاشف بدفرجام آن، دولومین<sup>۱</sup> زمین‌شناس ساخته شدند. ۱. Dolomieu دودادوگرانه دو ۱۷۵۰ - ۱۸۰۱ زمین‌شناس فرانسوی که در زندان با دوده چراغ چند کتاب نوشته است.

آقای وازوم<sup>۱</sup> در همان اوان نشان داد که برای آماده‌سازی یک ماده چسبنده نسوز چکار باید کرد. اما متالورژی با ساختن کوره‌های زیمنس - مارتن و عمل آسترکاری کوره‌های بلند، که اسکلت آن فلزی شده بود، بی‌شبهه برای شناسایی آسترکاری از همه بیشتر کوشیده است. صنایع شیمی بزودی از آن بهره‌ای تام گرفت. منیزی (اکسید با هیدروکسید منیزیم - م) که در ترکیب بعضی سیمانها وارد شده بود برای آسترکاری کوره‌های دارای عملیات شیمیایی با چنان سهولتی بازار یافت که طی تنها بیست سال یک ردیف کامل فراورده‌های با پایه ترکیبات منیزی به تقاضاهای گوناگون پاسخگو شدند.

### گرم کردن با گاز و با بخار آب

روشهای گرم کردن نیز طی نیمه دوم سده نوزدهم تغییر یافتند. کوره بازتابی در یک سده پیش، جانشین کوره‌های گرم‌سازی با شعله مستقیم، و گرم‌سازی با گذراندن گازهای گرم سوخت شد. علت اینکه کوره بازتابی پیش از دهه دوم یا سوم سده بیستم کنار گذاشته نشد، این بود که برای بعضی عملیات هنوز چند مزیت اقتصادی و بویژه از نظر متالورژی داشت. این کوره در تهیه سود لوبلان با روش کلاسیک هم فعال بود. مؤسسات کوچک، زندگی خود را مدیون وفاداریشان به تکنیکهای کلاسیک می‌دانستند و از سرمایه‌گذاریهای بزرگ برای تغییر دادن تجهیزات خود پرهیز داشتند.

تبادلگرهای حرارت: اصل دودکشهای مبادله‌کننده حرارت، که متالورژی آن را در سالهای ۱۸۵۰ به میدان آورد، رفته‌رفته در صنایع شیمی متناسب با تکمیل شدن تجهیزات پذیرفته شد. پس از کوپر و سیستم وی که تبادلگر دو جریانی هوای سرد ورودی و گازهای گرم خروجی بود، آقای زیمنس تبادلگر متناسب خود را طرح کرد که سبب سرعت گرفتن پیشرفت این وسیله شد. دستگاه زیمنس از دو جفت تبادلگر تشکیل می‌شد: هوای سرد و گازهای سوختی که از گازساز می‌آمدند، مسیری جدا از یکدیگر داشتند. هوای سرد قبلاً در محل خروج گازها از کوره، توسط گازهای سوختی که جریانی مخالف آن داشتند، گرم می‌شد.

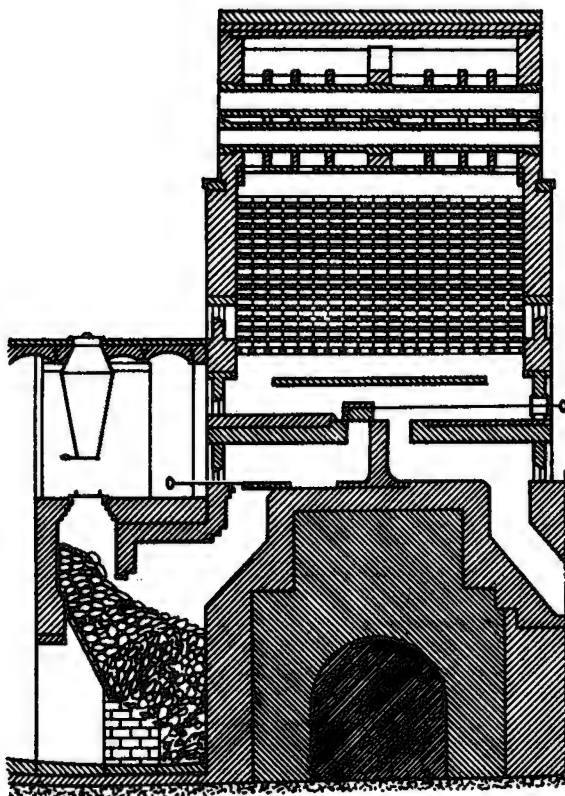
آنها در شیپوره تبادلگر، نزدیک سقف گنبدی کوره با یکدیگر مخلوط می‌شدند و شعله بیرون می‌زد. در همین حال، فراورده‌های سوختی گرم با گذشتن از هر دو بخش تبادلگر حرارتی دوم، از کوره خارج می‌شدند. سپس جریان برعکس می‌شد و تبادلگر دوم گرمای بازیافتی را به گازهای ورودی انتقال می‌داد که این گازها نیز پس از سوختن، گاز اولی را گرم می‌کردند.

گازسازها: زیمنس نخستین آزمایش این دستگاه را در سال ۱۸۵۹ انجام داد، اما اختراع وی زمانی اهمیت خود را نشان داد که گازسازهایی که گازهای سوختی - نه روشنایی - تولید می کردند ساخته شدند. این نوآوری در کارخانه هایی از سیدروزی (آهنکاری) شکل گرفت که کک در اختیار آنها بود و در آنجا گازهای کک سازی و نیز گازهای دهانه کوره برای سوخت به کار گرفته می شدند، و این زمانی بود که هنوز از این گازها برای کار موتورهای گازی به طور سیستماتیک استفاده نمی شد - کاری که در سال ۱۸۹۰ آغاز شد تهیه اقتصادی گازهای سوختی، با تجزیه آب از طریق گذراندن آن روی کک سرخ شده یا با سوخت ناقص کک، بود. در روش نخست، گاز آب، بیشتر از هیدروژن و اکسید کربن ترکیب شده است، و در روش دوم، گاز سوختی محتوی اکسید مخلوط با نیتروژن و نیز درصد کمی، گاز کربنیک است.

نخست از گازهای سوختی استفاده شد. آقای ابلمن<sup>۱</sup> مدیر کارگاه چینی سازی سور، نخستین کسی بود که اصل استفاده زغال سنگ، کک و دیگر سوخته های جامد کمتر غنی، لینییت و تورب را برای تولید، با اکسایش آرام، اکسید کربن مخلوط یا غیرمخلوط با فراورده های تقطیر و همچنین کاربرد آنها برای گرم کردن کوره ها، نشان داد. زیمنس نخستین گازساز را که با تبادلگرهای حرارتی وابسته بود ساخت و در آن زمان آن را ژنراتور نامیدند که تولید فولاد پیر-امیل مارتن با کمک آن در سال ۱۸۶۰ ممکن شد. صنعت پخت شیشه نخستین صنعتی بود که از این دستگاه، بهره گرفت، زیرا گرمای پیوسته با صرفه جویی ۶۰٪ با این وسیله میسر بود. پس از آن گاز روشنایی برای کوره های قرعی تقطیر خود، از آن سود برد (شکل ۱۵). صنایع دیگر شیمی از آن برای گرم کردن، نخست کوره های بازتابی و سولفات سدیم، استفاده کردند.

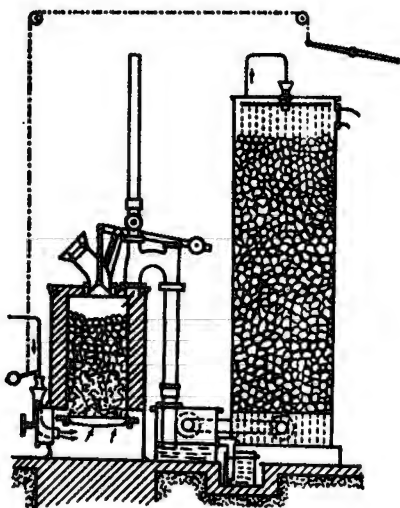
آقای زیمنس، در ترویج اختراع خود و به کار گرفتن آن در صنایع گوناگون، طبعاً پر حرارت بود. صنعتگران دیگری انواع گوناگونی از آن را پیشنهاد کردند. در ۱۸۸۷ ساخت صنعتی گاز آب آغاز شد. واکنش آب روی زغال چنان رهبری می شد که بویژه گاز کربنیک - نه اکسید کربن - با هیدروژن تشکیل شود. مقدار گاز کربنیک را از طریق همزدن محصول، در یک محلول قلیایی کاهش دادند. این گاز خالص شده به مدت چند سال در امریکا برای روشن سازی به کار گرفته می شد. چنین آزمایشی در فرانسه هم انجام گرفت، اما بی درنگ رها شد.

تولید گاز آب تنها زمانی گسترش یافت که تجهیزات یک گازساز رضایتبخش در سال ۱۸۸۷ در شهر اسن آلمان ساخته شد. گاز آب می بایست در پایان دهه نخست این سده، زمانی که کارخانه بادیش انیلین اوند زودا فابریک<sup>۲</sup> دست به تهیه آمونیاک سنتزی زد اهمیت بسیار یافته باشد.



شکل ۱۵. گازساز با تبادلگر حرارتی، ساخت زمینس.

پایین، سمت چپ، گازساز با قیف بارگیری آن. در وسط، تبادلگر حرارتی که در واقع، در اثر گازهای سوخته‌ای که آن را گرم می‌کند و از سوراخ سمت راست پایین به بیرون می‌روند، از بالا تا پایین ادامه دارد. جابه‌جایی صفحاتی تنظیم گرما از مرکز، امکان می‌دهد تا گازهای تازه، وارد تبادلگر شوند؛ این گازها قرار است حول ظروف تقطیر که در بالا گذاشته شده‌اند، بسوزند.



شکل ۱۶. گازساز مختلط داوسن.

سمت چپ، ورود بخار آبی که از دیگ بخار می‌آید که مقدار آن را شناور کنتور گاز تنظیم می‌کند (رسم نشده است). بخار آب از گازساز می‌گذرد، در بالای گازساز قیف بارگیری گذاشته شده است که بستن و باز شدن آن خودکار است. مخلوط گاز آب با گاز فقیر به یک بشکه همزنی با آب تلمبه می‌شوند، آن‌گاه برج شست‌وشو را که با کک پر شده است از پایین به بالا طی می‌کنند، درحالی‌که آب از بالا به پایین جریان دارد.

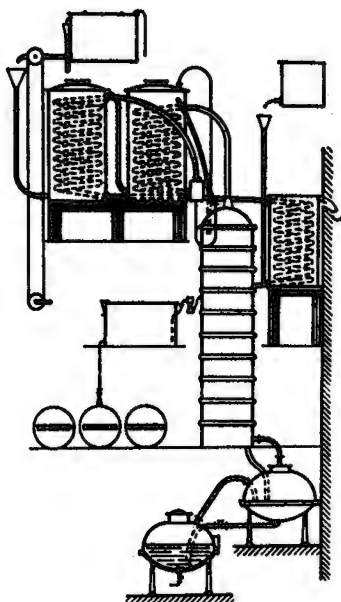
اما تا آن زمان بیشتر از مخلوط گاز و هوا و گاز آب استفاده می‌شد و آن را، گاز مخلوط و بعدها گاز فقیر می‌نامیدند. معنی اصطلاح اخیر پیوسته در تغییر بوده است. گازسازهایی ساخته شدند که اساساً از کوره‌های عمودی مملو از سوخت فروزان تشکیل می‌شدند. زیر پنجره آتشدان آنها آب تزریق می‌شد. این آب تبخیر و با هوای دمیده وارد کوره می‌شد. انواعی از گازسازهای کوچکتر، که نصب آنها نیز ساده‌تر بود، طرحریزی شدند. رایجترین آنها گویا گازساز داوسن<sup>۱</sup> (۱۸۸۷) بود. تردیدی نیست که آوازه آن مرهون شهرت دویس (سازنده موتور گازی اوتو در شهرستان کولونی) بوده است. این وسیله، اساساً از یک دیگ بخار، گازساز، دستگاه گازشویی پر از کک و بالاخره یک کنتور گاز تشکیل شده است (شکل ۱۶). شناوری در کنتور گاز، بوسیله زنجیری که حرکت را انتقال می‌دهد، به ورود بخار آب که هوا آن را در خاکستر دان گازساز پس می‌زند، فرمان می‌دهد. هم ساخت کوره‌ها، و هم دستگاههای سازنده گاز سوختی، رفته‌رفته فلزی و مکانیزه شدند.



صنعت شیمی برای گرم کردن از وسایل دیگری استفاده می‌کرد که انعطاف‌پذیری لازم برای این صنعت را داشتند. در سال ۱۸۸۹ تزریق سوخت، گرد زغال، در کوره گردان لوپس برای تهیه سیمان پورتلند عملی شد. این روش و پس از آن تزریق مازوت بعداً نه تنها در صنایع شیمیایی، که در صنایع دیگر، بویژه برای تغذیه آتشدان دیگهای بخار مربوط به توربینها نیز به‌کار گرفته شدند. بخارآب: در بسیاری از رشته‌های تولیدی، بخار آب یا هوای گرم، خیلی زودتر از نیمه سده نوزدهم به‌کار گرفته شده بود. وسیله‌ای که برای تقطیر، تغلیظ و نمگیری از مواد بسیار مناسب بود؛ کارهایی که برای آنها دما می‌بایست ثابت و بسیار معتدلتر از روشهای شیمیایی خشک باشد. آقای ادوارد ادم نخستین کسی بود که در سالهای ۱۸۰۰ - ۱۸۱۰ از گرمای بخارآب در تقطیر استفاده کرد. این مخترع نخستین شکل انبیک مناسب تقطیر الکل محتوی در شراب را طرح کرده بود. موکاران در سپاسگزاری از او، مجسمه‌ی وی را در مونپلیه برپا داشتند. در واقع این صنعت الکل و نیز قندسازی بودند که استفاده از گرم کردن با بخارآب را پایه گذارند.

شماری از شیمیدانها یا دیگ‌سازان در دهه دوم سده نوزدهم این اصل را از نو به پیش کشیدند. در فرانسه، پس از ثبت امتیاز بلومنتال - سلیه<sup>۱</sup> (در نوشتار آن زمان این دو نام به شکل سلیه - بلومنتال قید شده است) بود که آقای دروسن که حقوق آن را به‌دست آورده بود نخستین تجهیزات تقطیر صنعتی را در سالهای ۱۸۱۸ - ۱۸۱۹ برپا داشت. پس از مدتی تأخیر، تنها از یک قدردانی برخوردار شد، این وسیله تقطیر در پایان سده بخت بلندی یافت (شکل ۱۷). نمونه‌های دیگری که در این دوران و پس از آن ساخته شدند تقلیدی از این وسیله بودند.

دروسن وکل: شارل دروسن در آغاز سده، داروساز بود. وی به ساخت قند چغندر علاقه داشت و وسایل لازم برای استخراج آن را طرح کرده بود. او بدین جهت به مسگری روی آورد، سپس زمانی که با یک مکانیسین با قریحه به نام ژ. - ف. کل شریک شد فعالیت خود را به ساخت وسایل مکانیکی - ماشینهای بخار، لوکوموتیوها، لوکوموبیلها، ماشینهای ابزار و غیره - گسترش داد. ساخت وسایلی برای صنایع شیمیایی که در ردیف کارهای مسگری بودند مدتهای زیادی از تخصصهای این شرکت بود که به دلایل گوناگون اجتماعی هنوز هم چنین است. تحول آقای دروسن وکل در نیمه نخست سده نوزدهم بخوبی گواه این امر است که تجهیزات بعضی شاخه‌های صنایع شیمی در آن زمان چگونه بوده‌اند. سرانجام ساخت این نوع دستگاههای راه تغییر شکل بنیادین صنعت بزرگ شیمی را در نیمه نخست سده نوزدهم گشود. کارگاه دروسن وکل طبعاً در این کار تنها نبود و بسیار کوچکتر از آن بود که جهت صنایع نوین را مشخص سازد. گرچه این کارگاه به‌علت محدود



شکل ۱۷. تقطیر الکل با دستگاه بلومنتال - سلیه.

دستگاهی که بوسیلهٔ دروسن - دوبرونفو تکمیل شده است. در پایین، وسط، ظرف تبخیر که با بخارابی که در جدار بیرونی گردش دارد، گرم می‌شود. در بالا، دیگ دوم با همزنی بخارهایی که از ظرف تبخیر آمده‌اند و برگشت بخارهای مایع شدهٔ ستون تقطیر، که ۱۸ بشقابک مشابه دارد. در بالا، سمت چپ، گرم‌کن شراب؛ سمت راست، خنک‌کنندهٔ ماریچی برای مایع کردن الکلی که در ظرف مرکزی جریان دارد.

بودن نسبی نیازها در همه شاخه‌های صنایع شیمیایی، در ساخت بعضی از وسایل و تکنیکهای ساخت آنها، شهرتی بهم زد؛ در رواج آن تنها نبود. جای شگفتی نیست که چنین وسایل ویژه‌ای، کاربرد صنعتی خود را در کشوری بیابند که در آن زمان در ساخت شراب و الکل شراب در جهان پیشتاز، و نیز یکی از اولین تولیدکنندگان قند از چغندر باشد.

آبجوسازی: به‌طوری‌که معلوم است تقطیر الکل از زمان نوته به بعد در انحصار هیچ کشوری نبوده است و منابع الکل خوراکی، علاوه بر عصارة انگور، فراوان بودند. از اینکه در گذشته، الکل را از یک مادهٔ گیاهی می‌گرفتند، جای تردید است. اما برای ساخت خوراکی این چنین متنوع و فراوان، روشهای سنتی گرم کردن با آتش تند، تقریباً در همه جا تا پایان سدهٔ نوزدهم کافی بود. این روشها

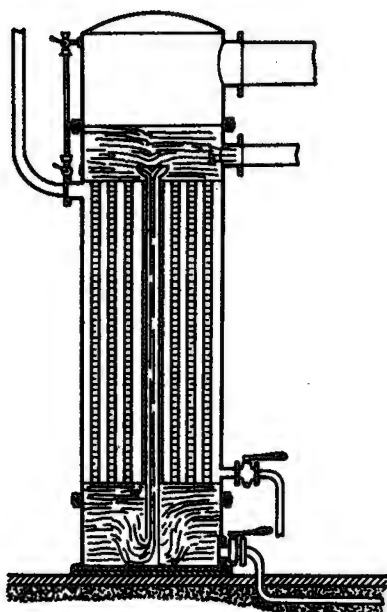
عبارت بودند از استخراج الکل از آب میوه یا شراب تخمیر نشده و تخمیر آنها، استخراج، تقطیر و بالاخره تقطیر دوباره آنها.

صنعت آبجوسازی، اگر به پیری خود جهان نباشد، اسناد اشرافیت خود را از دوران باستان دارد؛ گرم کردن دیگهای پخت جو با بخار، تا سال ۱۸۷۰ عمل نمی‌شد. این روش که طبعاً با احتیاط با آن برخورد شده است در زمانی عملی شد که صنعت آبجوسازی تعدادی وسایل مکانیکی، از جمله همزنهای گردان را از صنایع دیگر به عاریت گرفته بود. به‌رحال این روش در اواخر سده نوزدهم به‌طور قطعی پذیرفته شد. تردیدی نیست که در صنعت آبجوسازی، تنها مقدار تقاضای بازار موجب تحولی در وسایل کار یا حتی احتمالاً روشها بوده است.

تقطیر الکلهای: درباره تقطیر الکلهای باید گفت که افزایش سریع مصرف در میانه سده نوزدهم، از همان اوایل کار، تحول وسایل تقطیر مواد تخمیر شده را، از هر نوع که بودند، مطرح ساخت. آقای کامی ونسان<sup>۱</sup> می‌نویسد که در پاریس، مصرف الکلهای خوراکی ظرف ده سال (از ۱۸۶۴) دو برابر شد (۲۸ لیتر برای هر نفر در سال) و از سال ۱۸۳۳ سه برابر. باز هم این مقدار، کم بوده است. سوئدیه (جز کودکان و «بخشی از زنان») هر نفر در سال ۸۰ تا ۱۰۰ لیتر الکل می‌نوشیدند. همین نویسنده بسادگی اظهار می‌دارد که «مصرف الکل در انگلستان هم چشمگیر است». وانگهی باید گفت که کاربردهای صنعتی الکل، بسیار بیشتر از مصرف خوراکی آن افزایش یافت. برای نگهداری گیاهان و قطعات بدن گرفته تا بهتر کردن درجه سرکه و شراب، کاربردهای علمی و دارویی، ساختن عطر، بویژه اودوکلنی و ورنیه به الکل نیازمندیم. این ماده در سپیده دم آینده بزرگ صنعتی، مثلاً کائوچو و کلودیون وارد چرخه ترکیبی آنها شد.

برای پاسخگویی به این تقاضاهای جدید است که به استخراج الکل از مواد خام فراوان در طبیعت دست زدند تا بتوانند آن را یا از راه تخمیر، مثلاً چغندر، یا با تبدیل به قند، سپس تخمیر مثل دانه‌های حبوبات و بیش از همه، جو دوسر و جو، و سیب‌زمینی به‌دست آورند. عملیات پایانی، همیشه تقطیر و تقطیر دوباره بوده است.

وسيلة تقطیر آقای دروسن بی‌تردید برای نخستین بار اصول گردش مایع از پایین به بالا و بخارها از بالا به پایین از داخل یک ستون دارای چندین بشقابک، گذار از هر طبقه در حباب‌سازی به شکل ناقوس و برگشت در مدار مایعهایی که کاملاً تمام نشده‌اند را در داخل پراتیک صنعت کرد. نخستین اصلاحات این وسیله را آقای دوپرونو وارد کرد، اصلاحاتی که به بشقابکها و حباب‌سازها مربوط می‌شد. پس از وی طرحهای مخترعان، انواع فراوانی از این وسیله را به نمایش گذاردند که



شکل ۱۸. دیگ بخار لوله دودی ساوال برای تقطیر الکل.

لوله عمودی، شراب ضعیف را به بالا می‌رساند. شراب در لوله‌های عمودی از پایین به بالا و از بالا به پایین ستون بخار آب گردش می‌کند. الکل بخش بالایی دستگاه را پر می‌کند و لوله‌ای که در بالا، سمت راست قرار دارد آن را خارج می‌کند. در پایین، سمت راست، شیر خارج کردن بخارهای مایع شده و در زیر آن شیر خارج کردن شراب عمل آمده است. بالا، سمت چپ، ورود بخار.

از اصل بنیادین تخطی نشده بود و تفاوت آنها با یکدیگر، تنها در شکل و ترتیبات دستگاه بود. ردیف وسایلی که آقای د. ساوال<sup>۱</sup>، تقطیر کار فرانسوی، در لاهه طرح کرد موفقیت پردوامی داشت و تقریباً همه آنها نیم سده در کار بودند. آقای ساوال بی‌شبهه اندیشه استفاده از یک ماشین بخار لوله دودی برای گرم کردن موادی که می‌خواست آنها را عمل آورد (کاری که مثلاً برای شراب خام چغندر یک امتیاز بود) و نیز رقیق نکردن آنها را از آقای کل گرفته بود (شکل ۱۸). دستگاه ساوال را بویژه حدود سال ۱۸۷۰ آقای ماکس اشپرینگر<sup>۲</sup> تقطیر کار اهل وین پذیرفت و در کارخانه خود Maisons-Alfort از آن برای تهیه مخمر خالص آبجو استفاده کرد. این شخص اولین کسی بود

که با خمیر مواد نشاسته‌ای که از حبوبات به دست آمده بود، این مخمر را تولید می‌کرد. ساخت الکل از دانه‌های غلات با سرعت زیادی در هلند و بلژیک در آغاز نیمه دوم سده نوزدهم رواج یافت. در این کار تعدادی فراورده‌های جنبی به دست می‌آمد که چه از لحاظ غذای دام و چه به عنوان کود ارزش بازرگانی داشتند. قندی کردن در مجاورت دیاستازی انجام می‌گرفت که بوسیله مالت جو به دست می‌آمد. این عمل را همچنین از مدتها پیش بوسیله اسید کلریدریک در طشت سرباز انجام می‌دادند، که روش پرخرجی بود. در حدود سال ۱۸۷۰ کار کردن با اتوکلاو شروع شد، که، اولین نمونه گرم کردن زیر فشار بود و صنعت شیمی آن را به خدمت گرفت. این روش در ۱۹۰۰ کاملاً جانشین گرم کردن در طشت سرباز شد.

استخراج قند: صنعت قندسازی از چغندر، موازی با صنعت تولید الکل، انگیزه ساخت تجهیزات تازه‌ای شد که با کاربرد قطعات بزرگ و شیرآلات فلزی، مکانیکی کردن جابه‌جایی مایعات و بخار آب در تغییر شکل وسایل صنایع شیمیایی، به طور کلی تأثیر داشت. همین شیمیدانها و سازندگان وسایل که در تغییر وسایل تقطیر دست داشتند در اصلاح وسایل استخراج و تغلیظ شربتهای قند نیز تأثیر گذاشتند. معلوم است که چغندر قند در دوران محاصره قاره اروپا در آغاز سده نوزدهم، مورد آزمایشهایی برای استخراج قند قرار گرفت. نخستین قندسازان فرانسوی، جز چند عمل ویژه مربوط به نوع این ماده خام جدید، از روشهایی استفاده می‌کردند که از سده‌های پیش برای استخراج قند از نیشکر به کار گرفته می‌شد. پس از پایان جنگهای امپراطوری، صنعت بومی قند (این اصطلاح تا پایان سده برای قند چغندر به کار گرفته می‌شد) که تازه تولد یافته بود سالهای طولی را در رکود گذراند. این صنعت از شمال فرانسه به بلژیک، آلمان، اروپای مرکزی و بعدها به روسیه راه یافت، اما تولید آن سقفی داشت زیرا واردات قند نیشکر که بخش بزرگی از آن در اروپا تصفیه می‌شد آن را محدود می‌کرد.

در سال ۱۸۲۸ هنوز تولید قند چغندر در فرانسه به ۳۰۰۰ تن نمی‌رسید. بعداً این تولید در سالهای ۱۸۳۵ - ۱۸۴۰ به حدود ۵۰۰۰۰ تن بالغ شد؛ اما در سال ۱۸۵۵ اختلال بزرگی در تولید، آن را به ۲۰۰۰۰ تن کاهش داد و این بخاطر شیوع نوعی بیماری در چغندر قند بود که به اندازه کافی آن را نمی‌شناختند. این دوره‌ای بود که نخستین تجهیزات نوین - گرچه هنوز از جنبه شکل و اصول کار، به تکنیک سنتی بسیار نزدیک بودند - به میدان آمدند. اما این موج نخست تحول، تنها بدین دلیل برخاست که بعضی از این تجهیزات، نخست برای بهره‌برداری در آن سوی دریا و بویژه جهت مؤسسات فرانسوی تولیدکننده قند در جزایر آنتیل و کوبا طرح‌ریزی شده بودند.

پیشرفت صنعت بزرگ قندسازی اروپا در ۱۸۵۶ آغاز شد و با وجود نوسانهای اوضاع ادامه یافت. در فرانسه، تولید طی پانزده سال، چهار برابر شد: ۹۲۰۰۰ تن در ۱۸۵۶ و ۴۰۰۰۰۰ تن در فصل بهره‌برداری ۱۸۷۲ - ۱۸۷۳. با آغاز این دوره، قند یک غذای رایج و حتی همگانی شد و مصرف سرانه آن در همه کشورهای، سریعاً افزایش یافت. این صنعت که بخوبی مجهز شده بود محصول زیادتر و بازار بیشتری یافت و از زمانی که عوارض مربوط به آن در همه جا به مقدار زیادی کاهش داده شد با سهولت بیشتری گردش یافت. این افزایش تقاضا سبب تکمیل و حتی در بعضی از قسمت‌ها تغییر شکل تجهیزات صنعتی شد. در فرانسه تولید آن از یک میلیون تن در دوره بهره‌برداری ۱۹۰۰ - ۱۹۰۱ گذشت، درحالی که تولید قند در آلمان دو برابر، و در اتریش و روسیه کمی بیشتر از مقدار تولید آن در فرانسه بود. در ممالک متحده آمریکا، مقدار تولید بین دوره‌های بهره‌برداری ۱۸۹۸ - ۱۸۹۹ و ۱۹۰۱ - ۱۹۰۲ پنج برابر شد (۱۶۳۰۰۰ تن در این دوره). گرچه در بازار جهانی، ممالک متحده آمریکا در تولید قند از چغندر قند مقام پایینی داشت، در تولید قند از نیشکر، پس از کوبا، و در مقام دوم بود. این قند تقریباً فقط در لوئیزیانا تهیه می‌شد و مقدار آن در ۱۹۰۱ - ۱۹۰۲ به ۳۰۰۰۰۰ تن در برابر ۸۴۰۰۰۰ کوبا رسید.

پیشرفت قندچغندر مانع افزایش قند نیشکر نبود. در اواخر سده نوزدهم، تولید جهانی قند برای مصرف نیشکر (قند کلنیال) طی سه سال به یک میلیون تن رسید که ۲۵٪ تولید ۱۸۹۹ - ۱۹۰۰ بود.

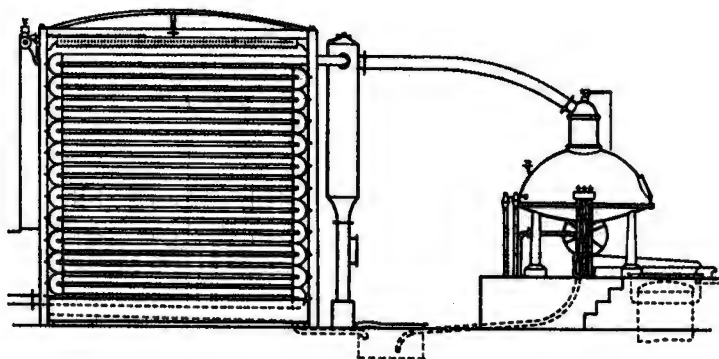
بدین ترتیب، و فوریک ماده غذایی اصلی از این نوع در نیمه دوم سده نوزدهم حاصل شد. در اینجا با نمونه بسیار جالب پدیده‌ای روبه‌رو هستیم که امروز اقتصاد مصرف اصطلاح شده است. عوامل این پیدایش دقیقاً همانهایی هستند که بر نوآوریهای عظیم معاصر فرمان می‌رانند: بررسی آزمایشگاهی فراورده‌ای نسبتاً کمیاب، منجر به شناخت بهتر این فراورده در چارچوب تحول دانش بسیار جوانی به نام شیمی آلی شد؛ آغاز تولید یک ماده جانشین فراورده سنتی تحت تأثیر حوادث نظامی؛ تأثیر آرام در کار شرایط اقتصادی و صنعتی؛ توسعه اولیه به برکت تعمیم وسایل حمل و نقل با بخار؛ پیدایش یک نظریه ترمودینامیکی تغذیه و آشکار شدن قدرت زیاد گرمابخشی این فراورده؛ تکامل تکنیکهای تولیدی که بهای فروش را پایین می‌آورد و بالاخره موفقیت قطعی در پرتو نیازمندی کلی به یک تغذیه بهتر که می‌تواند (با افراط در خوردن یا در صرفه‌جویی) بخش روزافزونی از مردم کشورهای صنعتی را، در سایه اقتصادی کلی مبادله، که جانشین اقتصاد روستایی شده است، فروش کار شخصی و خرید فراورده‌های مصرفی، راضی کند.

استخراج و تصفیه قند، چه از نیشکر و چه از چغندر، متضمن یک رشته کارهاست که به محض اینکه بهره‌برداری اهمیت یافت، مکانیکی شدند. ماشین بخار در صنعت قندسازی دستاوردی اساسی بود. این ماشین نه تنها بالابرها، قطعات گردان شوینده، رنده‌ها، پرسها و تلمبه‌ها را به حرکت آورد، بلکه این بخار دیگ و بعدها بخاری که ماشینها را حرکت داده است، باعث گرم کردن دیگهای تصفیه شربت خام با آهک، دیگهای کربنات گردانی که آهکی را که در شربت محلول است رسوب می‌دهد، دیگهای گرم کردن مجدد، پیش از تصفیه با زغال حیوانی و بالاخره دستگاههای چند منظوره برای پخت یا تغلیظ پایانی شربت شد. اگر دانسته شود که بعضی از این عملیات در یک دستگاه ویزه برای تخلیص تکرار می‌شود روشن خواهد شد که دامنه کار این تجهیزات تا چه اندازه است و وسایل گرم‌سازی تا چه اندازه اهمیت دارند.

در دوران تکنیک سنتی همه عملیات را با دست و گرم‌سازی را با آتش مستقیم انجام می‌دادند. زمانی که حجم ماده مورد عمل در سالهای ۱۸۳۰ - ۱۸۴۰ چنان افزایشی یافت که حتی در کارخانه‌های مستعمرات هم، که مزد کارگر بسیار پایین بود، سرعت تولید و کیفیت تازه خلوص، سفید کردن و نیز هزینه عرضه کالا، که از این پس برای نگهداری رقابت قندهای نیشکر با قندهای چغندر تحمیل شده بود، مکانیکی کردن کارها و استفاده از بخار آب را ناگزیر ساختند.

تغلیظ در خلاء جزئی: میل به اختراع، همزمان در همه بخشهای تجهیزات می‌جوشید، و با وجود تنگناها در کار تولید، راه دیگری در پیش نبود، این تلاش خلاق، کمی پس از آزمایشهای نخستین بهره‌برداری قندچغندر آغاز شد و تا اواخر سالهای ۱۸۵۰ ادامه یافت. برای گرم کردن، کاربرد بخار آب فوراً پذیرفته و پیشرفته شد و پیشرفتهایی که به مدت نیم سده در این مسأله که مرحله پایانی تغلیظ شربت است؛ ایجاد شد، اهمیت خاصی دارد. در سال ۱۸۱۲ آقای هوارد صنعتگر، نخستین دیگ تغلیظ در یک خلاء جزئی را ساخت؛ اما گویا این دیگ تا ۲۰ یا ۲۵ سال بعد به کار گرفته نشد. در این دوره، کار تغلیظ در دیگ سربازی انجام می‌گرفت که به توسط مارپیچ مسطحی که افقی در ته دیگ می‌گذاشتند، گرم می‌شد. آقای اونیفرور پکور<sup>۱</sup> مکانیسین فرانسوی در سال ۱۸۳۵ دیگری از این نوع ساخت که در آن زمان، عالی ارزیابی شد.

آقای شارل دروسن در همان زمان گویا برای داماد خود، لبودی<sup>۲</sup> که می‌خواست چند سال بعد در آنتیل یک کارخانه قند تأسیس کند دیگری ساخت که با بخار گرم می‌شد و از آزاد شدن بخار حاصل از تغلیظ برای گرم کردن یک باتری مرکب از دو مارپیچ عمودی استفاده کرد. شربت که هنوز رقیق بود روی آن جریان می‌یافت و بدین ترتیب نخستین تغلیظ، پیش از اینکه به دیگ فرستاده

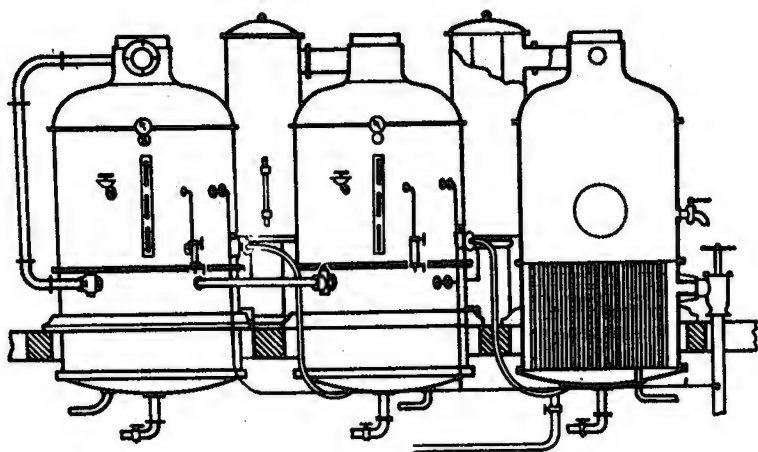


شکل ۱۹. دستگاه دروسن و کل برای تغلیظ شربت قندچغندر و نیشکر. شربتی که زلال شده است، به بالای ماریچه‌های سمت چپ برده می‌شود. بخار آب حاصل از تغلیظ در دیگ سمت راست، ماریچه‌ها را گرم کرده‌اند. در پایین، سمت چپ، لوله مکش بخار دیده می‌شود. شربت پس از تغلیظ اولیه، از ظرف مرکزی به دیگی که دو سقف و دو کف دارد برای گرم شده با بخار آب رانده می‌شود. در وسط، در ستون عمودی، شربتی که جوش آمده است، جمع می‌شود.

شود انجام می‌گرفت (شکل ۱۹). در انتهای ماریج، تلمبه‌ای در لوله‌ها و دیگ، خلاء جزئی ایجاد می‌کرد. نخستین تغلیظ، که در هوای آزاد انجام گرفته است طبعاً در فشار جو بوده است. این وسیله که بعدها آن را دو بخشی نامیدند به صرفه‌جویی در سوخت که در مستعمرات کم بود پاسخ می‌داد. در نواحی دیگر این وسیله دو بخشی را در ستونی دارای قسمت مرکزی ایجاد کردند و بخار آب در آن تزریق می‌شد. آقای ریلو<sup>۱</sup> امریکایی اندیشید که به این نوع دیگ، بخش سومی را بیفزاید و بخش دوم و سوم، با بخار آب مرحله تغلیظ گرم شوند. اما کسی که بتهایی این مؤسسه مشترک را پس از ناپدید شدن آقای دروسن در سال ۱۸۶۴ عهده‌دار شد و در سال ۱۸۵۶ شکل قطعی این مؤسسه را تعیین کرد، کسی جز ژان - فرانسوا کل نبود.

مؤسسه دروسن - کل از ساختن تجهیزات قندسازی و تقطیر به میدان مکانیک گام نهاد و از تجربیات خود در تولید بخار برای ساختن ماشینهای بخار و لوکوموتیوها استفاده کرد. آقای کل اندیشه به‌کار گرفتن اصل دیگهای لوله دودی بخار را برای گرم کردن شربتی که باید تغلیظ می‌شد، پیش کشید (شکل ۲۰). هر سه بخش دیگهای وی مشابه یکدیگر بودند. بخش پایینی، دیگی با لوله‌های بخار گذر بود که شربت بین آنها به‌علت آثار ساده همرفتی (کنوکسیون) و جوشش،





شکل ۲۰. دستگاه تغلیظ سه بخشی ریلیو، ساخته کل.

بخار از لوله‌های سمت راست وارد می‌شود و در لوله‌های پایین دیگ اول می‌گردد. شربت به جوش آمده است. لوله‌ای بخار آب شربت را می‌گیرد و در دیگ دوم، که مشابه اولی است وارد می‌کند. همین عمل بین دیگ دوم و سوم تکرار می‌شود. لوله‌هایی شربت را وارد دیگها می‌کنند.

میان بخش بالایی و کف دوگانه جریان می‌یافت. بخش نخست را بخار آبی که از ماشین بخار کارخانه خارج می‌شد گرم می‌کرد. دو بخش دیگر، بر پایه اصل ریلیو، یا بخار آب مربوط به تغلیظ شربت در یک یا دو دیگ گرم می‌شدند. یک تلمبه هوا و آب با دیگ سوم از طریق یک چگالنده (کندانساتور) ارتباط می‌یافت تا آب و بخار آبی را که تشکیل شده است حذف و خلاء جزئی را که در دیگ نخست پیشرفته‌تر از دو دیگ دیگر است حفظ کند. این وسیله نخست در دمای  $80^{\circ}$  تا  $70^{\circ}$  درجه به‌کار می‌رفت و سپس در  $60^{\circ}$  تا  $50^{\circ}$  درجه، تا امکان حفظ دمای کافی، با کاربرد تنها بخار فراری از استوانه ماشین وجود داشته باشد.

آقای کل، با چنین راه‌حل عالی در اصول، توانست دستگاهی آن‌چنان رضایتبخش بسازد که دستگاههای سه بخشی وی، مدلی از گرم کردن صنعتی شدند که در شاخه‌های متعددی از تولید، هنوز کاربرد دارند.

بدین ترتیب، صنعت تهیه الکل، همزمان با قندسازی، انگیزه پیدایش و سپس گسترش صنعت دستگاههایی کاملاً جدید در رشته صنایع شیمی در سده نوزدهم بودند و سراسر در تکنیک پیچیده‌ای

وارد شدند که در این دوران ایجاد شده بود. تکنیکی که کاملاً از ساخت دیگ ماشین بخار و وسایلی که از آن منشعب می‌شدند الهام گرفته بود. لازم است بدین نکته هم توجه داشت که این تحول تکنیکی در این موقعیت، همگن بود: دیگ‌سازی، بعد ساختهای متالورژی که به ریخته‌گری، ماشینهای ابزار (فرآیندهای مکانیکی برای سوراخ کردن مهره‌ها)، پیچ‌سازی و غیره تکیه داشت. این تجهیزات از قطعات استاندارد فلزی، مس، ورق آهن یا چدن تشکیل شده بودند که به یکدیگر پیچ و مهره می‌شدند و تنه‌های حجیم آب‌بندی شده‌ای تشکیل می‌دادند که در گذر نیمه دوم سده نوزدهم برای کارهای تقطیر جزء به جزء و تقطیر دوباره سبب شد که گروههایی از فرآورده‌ها در مقیاس صنعتی ساخته شوند که به‌طور کلی در سالهای ۱۸۶۰ - ۱۸۷۰ به بازار سرازیر شدند و به مقدار زیاد در سالهای ۱۸۹۰ - ۱۹۰۰ به‌کار گرفته شدند.

عمل آوردن مواد چرب: صنعت مواد چرب که پس از کارهای میشل اوژن شورول<sup>۱</sup> (۱۸۱۳ - ۱۸۲۳) گسترش زیادی یافته بود، مانند صنایع دیگر دستخوش تحولاتی شد و از وسایلی که برای آن طراحی شده بودند و بر همان اصول ساخته شدند، استفاده کرد. این صنعت، هم روش گرم کردن در خلأ و هم گرم کردن همراه با فشار را ضمن نوسازی وسایل گرم‌کننده، به‌کار گرفت.

روش صابونی کردن پیه برای استخراج اسید استتاریک، با اثر دادن آهک در ظرف سربازی انجام می‌گرفت که با ماریچی که آب گرم از آن می‌گذشت گرم می‌شد. در سال ۱۸۵۵ آقای میلی<sup>۲</sup> نخستین سازنده شمعی استتاریکی در بیست سال پیش، توانست در یک اتوکلاو استوانه‌ای، در فشارهایی که به هشت اتمسفر می‌رسید، دو تن پیه را یکباره مورد عمل قرار دهد. با این روش، هم مصرف آهک و هم اسید سولفوریک مصرفی برای آزاد کردن اسید استتاریک صابون (این عمل در دیگ دیگری انجام می‌گرفت)، و نیز اتلاف مواد چرب کاهش می‌یافت. سرانجام، تهیه گلیسرین نیز، در زمانی که صنعت بدان به‌عنوان یک ماده خام مفید نیاز یافته بود، آسان شد. اتوکلاو آقای میلی مقام خود را تقریباً از سال ۱۸۸۰ تا حدودی به اتوکلاو کروی ل. درو<sup>۳</sup> واگذاشت. اما، با وجود این، چندین دهه دیگر نیز فعال بود. همین آقای درو صنعتگر، کمی بعد راه تقطیر کردن اسیدهای چرب را با گرم کردن در خلأ یافت.

آقای آخارت شیمیدان آلمانی، در پایان سده هجدهم ثابت کرد که مواد چرب را می‌توان با اسید سولفوریک صابونی کرد. مکانیسم این واکنش را شورول در ۱۸۲۴ بررسی کرد اما از کاربرد صنعتی آن تا مدتها عاجز بود تا اینکه آقای دوبرونفو در ۱۸۳۶ و پس از وی آقایان توماس و

۱. M.E. Chevreul (۱۷۸۶ - ۱۸۸۹): شیمیدان فرانسوی.

لورنس در ۱۸۳۷ برای خالص کردن اسیدهای چرب از راه تقطیر کوشیدند. گرم کردن آنها با بخار آب انجام می‌گرفت که مستقیماً در دیگ محتوی اسیدها تزریق می‌شد. بخار آب نه تنها اسیدها را تا دمای جوش گرم می‌کرد بلکه همزن آنها را هم می‌گردانید. در ۱۸۴۳ آقایان جان و ویلسن در انگلستان روشی را به ثبت رسانیدند که از بخار داغ آب استفاده می‌شد. در پایان آقای ل. درو به انتهای دیگ تقطیر یک تلمبه چگالش‌ی یا میعانی نصب کرد تا بتواند خلاء جزئی، ۳۰ سانتیمتر جیوه، ایجاد کند. با این روش، کار تقطیر شتاب گرفت و شرایط آن بهتر شد.

بدین ترتیب، استئارین در کمتر از ۵۰ سال توانست وسایلی برای گرم کردن بیافریند و به کار گیرد که در شاخه‌های دیگر شیمی صنعتی برای کارهای بسیار متفاوت از آنها استفاده شد. صنعت کلاسیک تهیه نمکهای معدنی در بسیاری از تولیدها، وسایلی برای تبخیر و نمگیری ایجاد کرد که در خلاء جزئی عمل می‌کردند. این وسایل که اساساً به عنوان تجهیزات صنعت قند شناخته می‌شوند از سالهای ۱۸۸۰ - ۱۸۹۰ جای تأسیسات پلکانی صنعت سنتی تهیه نمک را گرفتند و آنها تنها به عنوان دکوراسیون در سواحلی از دریا حفظ شده‌اند.

### تقطیر خشک مواد طبیعی

فرآورده‌های تقطیر چوب: روشها و دستگاههای تقطیر، در سالهای ۱۸۷۰ - ۱۸۸۰، زمانی که استخراج فرآورده‌های تصعیدی چوب و سپس مواد فسیلی، لینیت، شیس و نفت آغاز شد بسیار به هنگام به کار گرفته شدند. در مورد زغال سنگ باید گفت که دستگاههای تقطیر این ماده خام، خالص کردن و توزیع گاز و عمل آوردن فرآورده‌های جانبی در فرجه ۱۸۳۰ - ۱۸۵۰ به کار گرفته شدند و مدتی نزدیک به یک سده، دستخوش تحول بسیار آramی بودند، تنها روشهای تقطیر و تجزیه جزء به جزء هیدروکربنهای زغال سنگ که در شروع ساخت رنگهای مصنوعی ارزشمند شدند، به پیشرفت خود تحت تأثیر صنایع دیگر تقطیری ادامه دادند.

تقطیر خشک چوب و فرآورده‌های دیگر فسیلی در سده نوزدهم را نمی‌توان نوآوری به شمار آورد. اینها، شرایطی برای ایجاد نوآوری بودند و هدفهای جدید این عملیات، افزایش مقدار ماده مورد عمل و طولانیتر کردن ردیف فرآورده‌هایی بود که به بازار سرازیر شدند تا تغییر شکل کار پیشه‌وری را به شاخه‌ای از صنعت بزرگ شیمی اعلام دارند.

فرآورده‌های جانبی تصعیدشونده مربوط به تقطیر چوب در سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۸۶۰ با شتاب تمام دارای ارزش کالایی بسیار بیشتر از زغال چوب شدند که به‌طور سنتی، تنها فرآورده قابل فروش

## جدول ۱. فراورده‌های تقطیر چوب

چوب	اسید ناخالص تقطیر خشک چوب	اسید استیک ناخالص	تقطیر خشک آهک گندمگون		اسید استیک صنعتی — کلو فرم — یدو فرم	
			تقطیر خشک آهک خاکستری			
			شیر آهک استانی		استات مس (سبز خنثی) — اسید استیک خوشمزه — برای کنسروها	
			پیرو لینیست سدیم			
			استات سدیم متبلور			
			استات سدیم برقی			
			استات سدیم مذاب			
			پیرو لینیست سرب		فرمالدئید	
			استات سرب			
			پیرو لینیست آهن			
			استات آلومین			
چوب	اسید ناخالص تقطیر خشک چوب	متیلان ناخالص	متیلان ناخالص برای ساخت بعضی ورنیها		فرمالدئید	
			متیل برای الکل تقلیبی			
			کرنات کروئوزوت فسفات کروئوزوت تانو فسفات کروئوزوت کروئوزوت	کربنات کروئوزوت فسفات کروئوزوت تانو فسفات کروئوزوت کروئوزوفرم (ترکیب کروئوزوت و فرمالدئید) تانو کروئوزوفرم	کربنات گایا گول فسفات گایا گول گایا فرم تانو گایا فرم	
			قطران چوب	گایا کول مایع گایا کول متبلور طبیعی	گایا فرم	گایا فرم
			زغال روشن خارده	تغیر	دوده بریکت	زغال چوب
			زغال چوب	گرد و غبار		

این جسم بود. این جابه‌جایی هدفها در همان زمانی انجام گرفت که رشته سیدرورزی، در فرانسه بتدریج، از کاربرد زغال چوب به نفع کک چشم پوشیدند.

اما چنین نیست که بهره‌گیری از فراورده‌های جانبی، که تا نیمه نخست سده نوزدهم کاملاً نادیده انگاشته می‌شدند، گرایشی برای جانشین کردن و بقصد نجات صنعتی از اضمحلال باشد. تقطیر چوب، آن‌چنانکه در میانه این سده انجام می‌گرفت، در قریع فلزی که گردآوری فراورده‌های تصعیدی را ممکن می‌ساخت، واقعاً صنعتی متفاوت از کار تهیه زغال در سده‌های پیش بود.

در مراحل نخستین این صنعت نوین، تنها فراورده‌ای که استخراج می‌شد اسید استیک بود که در صنعت آن را اسید پیرو لینیو یا بسادگی پیرو لینیو می‌گفتند که اشاره به منشاء آن داشت. تخمیر

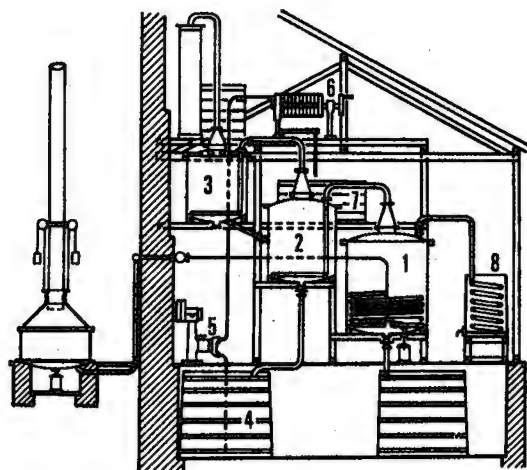
استیکی شراب تا مدت‌ها باز مهمترین منشاء اسید استیکی بود که در صنعت برای تهیه سفیداب شیخ  $[2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2]$  یا استات آلومین برای رنگ و استاتهای دیگر معدنی، مثلاً: سرب، مس و آهن به‌کار گرفته می‌شد. حدود سال ۱۸۷۰ بود که پیرولینیت آهک که با اسید کلریدریک، به اصطلاح «اسید هنرها» را از آن می‌گرفتند جانشین اسید استیک سرکه‌ای شد که دیگر تنها در مصارف پزشکی، فراورده آزمایشگاهی و ساخت سرکه کاربرد داشت.

در پایان باید گفت که بیست سال پس از این تاریخ، فراورده‌های تقطیر جزء به جزء اسید استیک ناخالص، دیگر فهرست بلند بالایی از ترکیباتی را تشکیل می‌دادند که مواد خام مهمی برای شمار روزافزونی از صنایع بودند.

انواع بسیار گوناگونی از قرعهای مربوط به تقطیر خشک خود چوب، بی‌درنگ به‌کار گرفته شدند. در آغاز، گزینش این ماده خام می‌توانست در سرنوشت گیاهان بسیار تأثیر گذار باشد. در حقیقت درختهای ۱۸ تا ۲۴ ساله را به‌کار می‌بردند. آنها را می‌بریدند و به مدت یک سال برای خشک شدن رها می‌کردند. خوشبختانه پیش از آنکه مصرف این چوب خیلی زیاد شود به استفاده از آخالها و خاک اره کارگاههای بخاری و مبل‌سازی روی آوردند. برپایه روشی که در آن زمان برای ساختن کوره‌ها رایج بود، قرعها با تماس مستقیم با آتش گرم نمی‌شدند بلکه از گازهای گرم ناشی از سوختن زغال‌سنگ برای این کار استفاده می‌شد و این گازها از گربه‌روها یا شیهایی به زیر قرع هدایت می‌شدند. مخلوط اسیدهای چوب (پیرولینیو) را سپس برطبق اصول معمول در صنعت الکل‌سازی، تقطیر جزء به جزء می‌کردند (شکل ۲۱). گرم کردن با بخار آب نیز طبعاً در کارهای تکمیلی مربوط به تهیه استاتهای قهوه‌ای یا خاکستری، آهکی، سپس برای استخراج اسید استیک و استون، تقطیر دوباره الکل متیلیک و از بین بردن قطران‌ها عمل می‌شد.

رواج این فراورده‌ها در بیست سال پایانی سده نوزدهم روزافزون بود. از این فراورده‌ها برای تهیه موادی از قبیل کلرومتیل برای دستگاههای ساخت آینه، و مواد دیگری برای تهیه مواد رنگ‌کننده، استخراج روغنهای اسانسی در عطرسازی و سرانجام مواد بیهوش‌کننده مخصوص جراحیهای کوچک، استون که در ساخت باروتهای بی‌دود، کلروفرم، یدو فرم، استات اتیل که آن نیز در ساخت مواد محترقه مصرف داشت، استفاده می‌شد.

تقطیر مواد فسیلی: تخریب خشک مواد فسیلی برای تولید گاز زغال‌سنگ، در آغاز گاه‌به‌گاه و سپس در سالهای ۱۸۵۰ - ۱۸۶۰ به‌طور پیگیر با لینییت، تورب و شیستهای قیری انجام می‌گرفت. در فرانسه روش تخریب خشک مواد اخیر از سال ۱۸۱۸ مورد بررسی بود اما تنها با تأسیس



شکل ۲۱. کارگاه تقطیر جزء به جزء اسیدهای چوب.

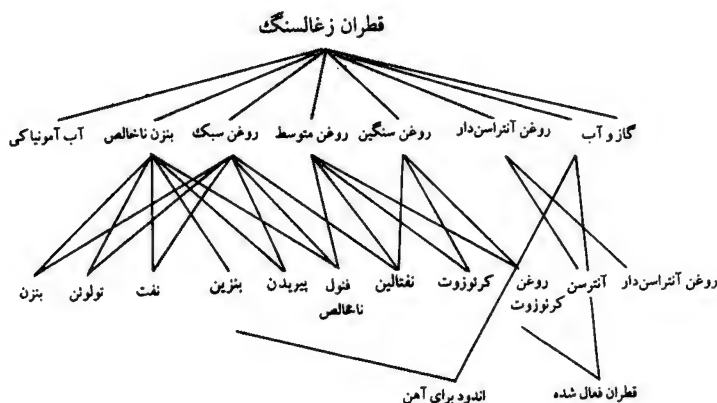
سمت چپ، دیگ تهیه شیر آهک که در طبقات مختلف تقطیر توزیع شده است. فرآورده ناخالص نخست در قسمت ۱ تقطیر می‌شود، آن‌گاه قسمت ۲ و ۳ را می‌گذرانند و با برگشت فرآورده‌های خنثی شده، وارد ۴ می‌شود. تلمبه ۵ مایع را می‌گیرد و از فیلتر پرس ۶ می‌گذرانند و در ظرف ۷ جمع، و از آنجا به دیگ تبخیر فرستاده می‌شود. در قسمت ۸ اسید استیک مستقیماً استخراج می‌شود و از آن برای اسیدی کردن مجدد مایع دیگرها استفاده می‌شود. عمل گرم کردن در همه جا با بخار آب است.

شرکت گازهای قابل حمل در پاریس در ۱۸۳۶، جنبه صنعتی به خود گرفت. با این روشها تا سال ۱۸۵۰ به طور جدی برخورد نکرده بودند. در این سال آقای اوگون که نام وی همچنین با انواع نخستین موتورهای درونسوز که با گاز روشنایی کار می‌کردند همراه است آن را وارد صنعت کرد. در واقع گاز ماده شیمیایی بزودی بی اهمیت شد، اما تقطیر قطران شیمیایی مدتها برای استخراج هیدروکربنهای سبک، پارافین و آمونیاک، عمل می‌شد. بزودی باگهد (baghead) (شیست اسکاتلند) را که از لحاظ فرآورده‌های قیری از شیست موجود در اوتون<sup>۱</sup> غنیتر، و رگه آن نیز بسیار مهمتر بود وارد کردند.

لینیت نیز از پارافین تهیه می‌شد و آن را بعدها در فرآورده‌های تقطیر نفت یافتند. اما باز شمار زیادی فرآورده‌های دیگر، کم و بیش شناخته شدند. بویژه در ساکسونی این روش به کار گرفته می‌شد و فهرستی از فرآورده‌های تقطیر جزء به جزء قطران آن به دست آمده بود شخص را تحت تأثیر قرار

۱. Autun: ناحیه‌ای در سون - ا - لوار کنار رودخانه آرو، در فرانسه.

## جدول ۲. فراورده‌های تقطیر قطرانهای زغال‌سنگ



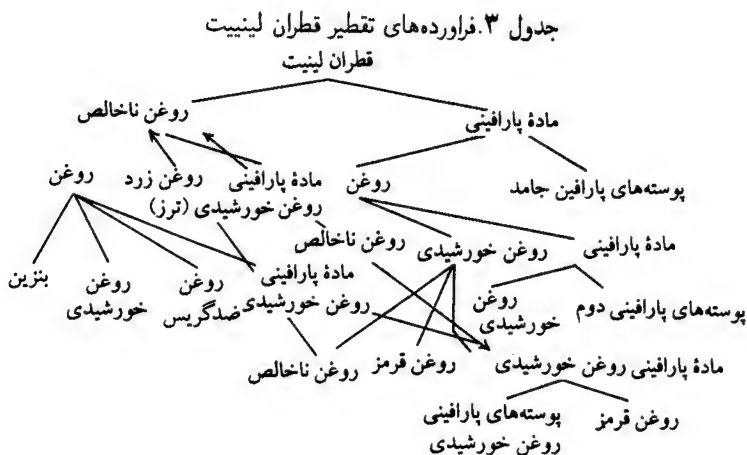
می‌داد. جدول بالا تصور دقیقی از انعطاف‌پذیری روشهای تقطیر، با تکمیلیایی که در اواخر سده نوزدهم در آنها طی سال پیایی انجام گرفته است به‌دست می‌دهد.

گوناگونی فراورده‌های استخراجی از قطران زغال‌سنگ نیز گسترده بود. چون تخریب خشک زغال‌سنگ بیش از لینییت اهمیت داشت مقادیر موجود از آن در بازار بسیار فراوانتر بود. اما رقابتی بین این دو رشته وجود نداشت زیرا مشتقات زغال‌سنگ اساساً از نوع ترکیباتی از ردیف آروماتیک (کریدهای حلقوی) بودند و حال آنکه مشتقات لینییت، اصولاً از ردیف ترکیبات چرب (همرده‌های بالاتر از متان یا از اتیلن) بودند.

تجهیزات تقطیر طبعاً از دستگاههای تکمیل شده برای صنعت الکل‌سازی گرفته شده بود. آقای د. ساوال در این شاخه اخیر نیز برای استخراج بنزن، یک ستون تقطیر دارای بشقابکها و حبابسازهاو نیز چگالنده (کندانسور) ای ساخت که با وزشهای منقطع دمی که ماشین بخار آن را می‌گرداند، خنک می‌شد. توسعه صنعت گاز روشنایی و بهره‌برداری از وسایل تقطیری که بیش از پیش تکمیل شده بودند. سبب شد که در بیست سال پایانی سده نوزدهم بهای ۱۰۰ کیلوگرم بنزن از ۵۰۰ فرانک (حداکثر بها) به ۲۵ فرانک (بهای میانگین) پایین آید.

بهره‌برداری از روغنهای شیسست، لینییت و تورب، در سالهای ۱۸۶۰، زمانی که نفت رواج بسیار زیاد خود را آغاز کرده بود، در رقابت شدید با آن افزایش یافت.

نخستین تقطیر صنعتی نفت: روشن است که شناسایی رگه‌های نفتی، در مواردی، از دوران باستان آغاز شده است. از سویی طی سده‌ها، نفت یا آن چیزی که ما اکنون بدین نام می‌شناسیم



با ترشحات سنگهای یا شنهای قیری اشتباه می‌شد. با این حال، در گذشته بسیار دور، کوششهای مکرر برای استخراج نفت مایع، طبعاً ناخالص، در مناطق مختلفی از جهان را می‌توان تشخیص داد. نیز روشن است که فراورده‌های استخراج شده تنها مصرف دارویی داشته‌اند. بهره‌برداری از این منابع در نیمه نخست سده نوزدهم گسترش یافت. بهای هر لیتر نفت (بدون در نظر گرفتن مشخصات آن)، در پیتسبورگ از ۲۳/۷۵ فرانک، بین سالهای ۱۸۵۰ و ۱۸۴۳ به ۱/۲۵ فرانک کاهش یافت. چنانچه این ارقام خیلی دقیق نباشند لاقلاً حدود را به ما نشان می‌دهند. تقطیر نفت، حدود سال ۱۸۵۰ در امریکا آغاز شد و در آن زمان بعضی از فراورده‌های تقطیر را برای روشن‌سازی مورد استفاده قرار می‌دادند.

بی‌شبهه با حفاری کاپتن دریک<sup>۱</sup> در تیتسویل<sup>۲</sup> که در ۲۷ ماه اوت ۱۸۵۹ در عمق ۲۲ متری به یک سفره نفتی فوران‌کننده رسید، دوران صنعت نفت آغاز شد. در واقع نه از لحاظ نفس اکتشاف و نه از جنبه حفاری، کار تازه‌ای نبود. پیش از وی کارهای بهتری شده بود. تنها یک اتفاق خوب به وی خدمت کرد و آن این بود که کار فرمایان وی از کاربرد نفت مطلع بودند و کسان زیادی کار او را تجدید کردند.

موفقیت تقریباً بی‌درنگ این استخراج بی‌تردید مدیون نتایج تقطیر است که نفت خام را بی‌درنگ در معرض آن قرار می‌دادند. روش تقطیر همان بود که مواد فسیلی دیگر و چوب متحمل آن می‌شدند. در این کار، خود را در برابر ستون جدیدی از ترکیبات هیدروژنی کربن یافتند که جدا کردن

۱. Drake، ادوین لونتین (۱۸۱۹ - ۱۸۸۰).

۲. Titusville: شهری در شمال غربی ایالت پنسیلوانیا، ممالک متحده امریکا



آنها از یکدیگر همان قدر دشوار بود که انواع هیدروکربنهای مختلف: به ترکیبات راست زنجیر اشباع شده یا ناشده، ترکیبات حلقوی. نامگذاریها بی قاعده، فوری شروع شدند که در هر ناحیه یک جور بود و بعضی از آنها هنوز هم، بدون اینکه فرآورده‌های یکسانی را بپوشانند، حفظ شده‌اند: گازولین (یا اتر نفت)، نفت، نفت چراغ، وایت اسپریت. بدین ترتیب، کار تقطیر بیش از امکانات کاربرد فوری خانگی یا صنعتی آن، سبب موفقیت نفت شد. نفت خام به شکل مخلوطی از ترکیبات گوناگون، خود را نشان داد و به فرآورده‌های دیگر استخراجی، بسیار شبیه بود و گوناگونی آنها را می‌توانست افزایش دهد. کنجکاوهای کسانی که در آزمایشگاه کار می‌کردند همان اندازه تحریک شده بود که طمع مقاطعه‌کاران که با این منبع ثروت، در آینده بسیار پولدار می‌شدند.

گرچه این صنعت در این زمان هنوز فاقد تکنیکهای پیشرفته تقطیر بود بی‌شبهه فن استخراج نفت خام هم با کندی بسیار به پیش می‌رفت. این کار با استفاده از روشهای عمل آوردن روغنهای قطران زغال‌سنگ، روشهای خالص کردن با اسید سولفوریک یا سود انجام می‌گرفت. همه اجزای تقطیر نفت خام و فرآورده‌هایی که با تقطیر مجدد هر کدام از اجزا به دست می‌آمدند متحمل مرحله خالص‌سازی شیمیایی می‌شدند. بدین ترتیب، این صنعت تازه که می‌رفت تا در دهه‌های دوم و سوم سده بیستم یکی از عوامل اقتصادی و فنی پیشرفت تمدن صنعتی شود در آغاز با فروتنی بسیار در مسیریایی از تکنولوژی لغزید که از پیش معین شده بودند.

رونق فرآورده‌های نفتی: رونق این فرآورده‌ها ظاهراً با لختی بسیار بود. در آغاز بخشهای متوسط تقطیر، نفت سفید، بود که برای روشن‌سازی به کار گرفته شد. گاز شهری بسیار کمتر از آن بود که همه محلات و خانه‌ها را روشن سازد. شمع استاریکی، با آن همه رواج و راحتی، نور چندانی نداشت. «روغن نفت» در سالهای ۱۸۶۰ جانشین روغنهای گیاهی منداب و میخک شد و بیست سال بعد کاربردی عمومی یافت. در اینجا هم اطلاعات تکنیکی کاملاً آماده بودند. تنها می‌بایست چراغ روغن‌سوز با دو جریان هوا و یک شیشه استوانه‌ای را که در آغاز سده اختراع شده بود برای استفاده از قدرت روشنایی بیشتر نفت، کمی اصلاح کرد. بازار از چشم دور نمانده بود، زیرا لااقل در کشورهای اروپا و امریکا پیش‌بینی می‌کردند که چراغ نفتی عملاً تا ۲۰ یا ۳۰ سال دیگر در همه آتشدها و همه دفاتر کاری که گاز شهری دریافت نمی‌کنند وارد خواهد شد و انواع گوناگونی خواهد داشت.

سبکترین بخش تقطیر، بنزین، بی‌درنگ به عنوان حلال صنعتی به کار گرفته شد. اما مصرف‌کننده اصلی این بخش، موتورهای درونسوز، حدود سال ۱۸۶۰ برای نخستین بار، به جای گاز روشنایی

از بنزین استفاده کردند. گسترش صنعت موتورهای بنزینی، تنها در سالهای پیش از جنگ جهانی اول، در نقشه‌های فنی و اقتصادی آغاز به خودنمایی کرد. این حالت هنوز تنها در امریکای شمالی دیده می‌شد. در واقع در طی سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ بود که بنزین اتومبیل و هواپیما برای اقتصاد جهانی و ارتش هر کشور، به فراورده‌ای اساسی تبدیل شد. پس از جنگ جهانی دوم، با رواج موتورهای دیزل، فروش گازوئیل که تا آن زمان در حالت رکود بود وارد دوران شکوفایی خود شد. در آن زمان صنعت نفت در اقتصاد جهانی اهمیت چشمگیری یافته بود.

آخرین رونق فراورده‌های نفتی در نخستین مراحل بهره‌برداری نیز با لختی بسیار همراه بود. این رونق مربوط به بخشهای بسیار سنگین دستگاه تقطیر - چربیها و روغنهای گریس - بود. برخلاف تصور عده‌ای، این فراورده‌ها گویا با قدری تردید از سوی مکانیسین‌ها به عنوان لیزانه یا ماده روغنکاری پذیرفته شدند. مشکل روغنکاری را با مواد موجود - روغن زیتون، روغن منداب، چربیهای گیاهی و حیوانی، گاهی مخلوط با گرافیت، روغن صمغ و پارافینهایی که از موم معدنی، بویژه لینییت و روغنهای شیسیت، به دست می‌آمد - برطرف می‌کردند. این فراورده‌ها که، با دقت، کمترین مقدار اسید آن گرفته می‌شد مشخصات مناسبی داشتند زیرا مکانیک صنعتی طی یک سده از پیشرفت پیوسته‌ای برخوردار بوده است. آنها با متن تکنیکی که در آن راه یافته بودند - مصالح موجود برای ساخت، کیفیت وسایل انتقال حرکت، سرعت گردش یا لغزش نسبتاً محدود - سازگار بودند.

یقین است که چنانچه روغنکاری با روغن‌ها و گریسهای معدنی استخراجی از نفت، دخالت نمی‌کردند موتورهای فنی نوین نظیر موتورهای درونسوز و اتومبیلها، تا پایان سده نوزدهم احتمالاً ساخته نمی‌شدند. در برهه ۱۸۸۰ - ۱۸۹۰ بود که کاربرد روغنهای نفتی مخلوط با لیزانه‌های دیگر گیاهی یا حیوانی شروع شد. یک دهه پس از این تاریخ، منحصرأ گریسهای نفتی در ماشینها به کار گرفته شدند. کنار گذاشتن کلی روغنهای گیاهی تا سال ۱۹۰۰ و حتی ۱۹۱۰ قطعی نبود و عاداتهای محلی تا مدت‌ها پابرجا بودند.

به هر تقدیر، تولید جهانی نفت با سرعت افزایش می‌یافت و مقدار آن از ۸۴۰۰۰۰ تن در ۱۸۷۰ به بیش از ۱۵ میلیون تن در ۱۸۹۶ رسید. دو تولیدکننده اصلی آن، یکی ممالک متحده امریکا با هشت میلیون تن و روسیه و قفقاز با شش میلیون تن بودند.

سودآوری این استخراج و نیز حس کنجکاوی برخاسته از استخراجهای صنعتی اولیه در پنسیلوانیا، بی‌درنگ مشوق اکتشافات نفت در سراسر جهان شدند. در کشورهای معدودی سنت رایج مانع توجه مردم به رگه‌هایی بود که استخراج آنها می‌توانست زندگانی را رونق بخشد. در واقع

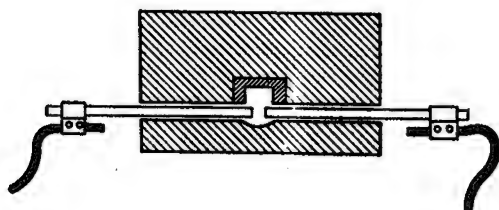
نفت در همه جا یافت می شد: در هانور، آلزاس، گالیسی (که در آن زمان در تملک اتریش بود)، رومانی، کریمه، قفقاز، سیبری، ایران، برمه، جاوه، چین، ژاپن، آفریقای مرکزی، جنوب استرالیا، کوبا، مکزیک، ونزوئلا، پرو، بولیوی، برزیل و آرژانتین.

بعضی از این معادن پس از مدت کوتاهی یأس آور شدند و تعدادی پس از گذشت نیم سده غنای خود را نشان دادند؛ تنها معادن موجود در ممالک متحده آمریکا و روسیه مورد بهره برداری قرار گرفتند که در پایان سده، تقریباً همه تولید جهانی از این دو کشور بود. همه می دانند که از آن زمان به بعد، جغرافیای نفت تغییر زیادی داشته است.

این موفقیتها یک تأثیر فنی نیز داشته اند. آنها انگیزه کوششهایی برای تکمیل وسایل تقطیر موادی از جنس دیگر- شیسست، زغال سنگ و لینیست- بودند. در چنین کوششهای تب آلودی که روحیه مقاطعه کاری نفت گران آمریکا بانی آن بود، تجهیزات این صنایع گوناگون متحول شدند و کارایی آنها نیز افزایش یافت. این مجموعه غنی، طی سه چهارم سده، بیشتر مواد خام مورد نیاز شاخه های نوین صنعت شیمی برای ساخت فراورده های صنعتی را تأمین می کردند. از سوی دیگر، می توان گفت که این تحول صنعت نفت بود که نابودی تدریجی تقطیر مواد دیگر- در آغاز قیر و شیسست و بعد، تورب و لینیست و سرانجام در میانه سده بیستم، تقطیر زغال سنگ را، که یکی از عناصر برتر مجموعه تکنیک کلاسیک سده نوزدهم بود- باعث شد.

### کوره های برقی

آخرین روش گرم کردن که در صنعت شیمی در سالهای پایانی سده نوزدهم به کار گرفته شد، کوره برقی بود. کاربرد صنعتی آن پس از کارهایی بود که در سالهای ۱۸۹۲ و ۱۸۹۳ آقای هانری مواسان<sup>۱</sup> را بلند آوازه کرد. اما متالورژی در این دوران از کوره برقی از همان زمانی که آقای زیمنس در سال ۱۸۷۹ نخستین مدل آن را برای ذوب آهن ساخت، استفاده می کرد. در برهه ۱۸۸۵ - ۱۸۹۰ الکترومتالورژی بسرعت رونق گرفت. این امر در محیطی سرشار از شوق به فن و دانش اتفاق افتاد. مواسان در سال ۱۸۹۲ اعلام داشت که وی به طور تصادفی می توانسته است در کوره ای با دو الکترود- که بین آنها یک قوس برقی پیوسته ایجاد می شد تا یک بوته یا لوله زغالی حاوی مواد بررسی گرم شوند- کاربید کلسیم تهیه کند. آقای مواسان برای تمرکز گرما بر محوطه واکنش، در داخل یک مکعب نسوز از سنگ آهکی که درون آن با منیزیم پوشیده شده بود یک قوس برقی ایجاد کرد (شکل ۲۲). وی بدین ترتیب توانست به دماهای ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دست یابد.



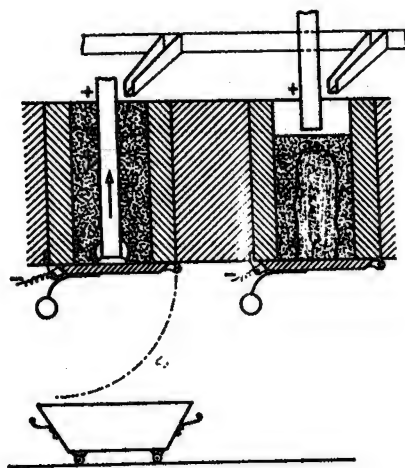
شکل ۲۲. مقطع کوره با قوس برقی آقای مواسان.

ساخت کاربید کلسیم: کربیدهای قلیاییهای خاکی ناشناخته نبودند. کاربید کلسیم با روش شیمیایی، احیای آهک بوسیله روی و کربن در دمای قرمز سفید، در سالهای ۱۸۶۱ - ۱۸۶۲ بوسیله فریدریش ولر به دست آمده بود و کربید باریم در همین سال ۱۸۶۲ بوسیله ماکن<sup>۱</sup> شیمیدانهای دیگری مانند ادمند دیوی<sup>۲</sup> در سال ۱۸۳۶ و آقای برتو در ۱۸۶۶ برای تهیه کربید پتاسیم یا سدیم کوشیدند و آن را تهیه کردند. سرانجام، در سال ۱۸۹۳ آقای تراورز<sup>۳</sup> شیمیدان انگلیسی موفق شد که با واکنش دادن مضاعف سدیم و زغال، کلرور کلسیم را به کاربید احیا کند. در همه این موارد، مشاهده کنندگان تذکر داده‌اند که اثر آب روی این ترکیبات ایجاد استیلن می‌کرد.

مواسان به مدت چندین سال با کمک کوره برقی خود یک ردیف کارهای جالب انجام داد که به وی امکان داد تا تشکیل شمار زیادی از کربورهای فلزی را بررسی کند و بویژه توانست در سال ۱۸۹۴ شرایط تشکیل کاربید کلسیم و خواص آن را مشخص سازد. اما کارهای وی تنها به بررسیهای آزمایشگاهی محدود می‌شدند و کسی که تولید صنعتی استیلن را پایه گذارد او نبود. این شخص آقای ل. بولیه<sup>۴</sup> دستیار وی بود که در فوریه سال ۱۸۹۴ امتیاز ساخت کاربید کلسیم در کوره برقی و نیز استفاده از آن برای تولید استیلن را به نام خود به ثبت رسانید.

پیش از وی نتایج کم‌وبیش روشنی به دست آمده بود. در سال ۱۸۸۰ آقای بورشرس<sup>۵</sup> شیمیدان آلمانی توانسته بود در کوره برقی کاربید کلسیم بسیار ناخالصی به دست آورد؛ باز در آلمان در سال ۱۸۹۱ امتیازی در این مورد به نام بوم<sup>۶</sup> به ثبت رسید. سرانجام چنین می‌نماید که آقای ت. ل. ویلسن متالورژیست امریکایی در سال ۱۸۹۱ نیز، بدون استفاده از روش بالا به تولید کاربید کلسیم دست یافت. مشاجره قلمی کوتاهی درباره پیشگامی، بین او و آقای بولیه، پس از انتشار امتیازهای اولیه بولیه در گرفت. بدین ترتیب، این موضوع یک مسأله روز شد. خواص استیلن نیز

1. Maquenne 2. E. Davy 3. Travers 4. L. Bullier 5. Borchers 6. Böhm



شکل ۲۳. کوره برقی بولیه، برای ساختن کرپور کلسیم.

کاملاً مشخص شدند. به طوری که این صنعت بسرعت راه افتاد. هر جا که انرژی برق در دسترس بود این کوره برپا شد.

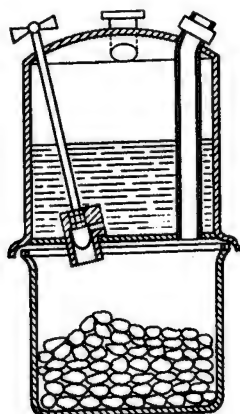
آقای بولیه این امتیاز را داشت که کوره مناسب تولید صنعتی این ماده را توصیف، و نسبت مخلوط مورد عمل را نیز تعیین کرد: آهک زنده ۵۶ قسمت و کربن ۳۶ قسمت. با تکیه بر همین پیشگامی است که وی به آقای ویلسن که به ثبت امتیاز خود در اوت ۱۸۹۲ تکیه می کرد، اعتراض کرده است. نخستین کوره بولیه از تکنیکهای کوره های برقی مربوط به الکترومیتالورژی الهام گرفته بود (شکل ۲۳). این کوره، شکل مکعبی داشت، آند عمودی آن را برای شروع کار کوره، پایین می آوردند و بتدریج که کار پیش می رفت بالا برده می شد. کاربید مذاب در انتهای آن جمع می شد. کاند، همانا کف فلزی دیگ بود که در حال نوسان حول لولاهایش باز می شد تا کاربید در قالبی که روی چرخ قرار داشت، بریزد. هر دو کوره، موازی یکدیگر کار می کردند. آقای بولیه که شرکت کرپورهای فلزی<sup>۱</sup> پشتیبان وی بود برای ساختن انواع دیگری از کوره های دارای سوراخ بارگیری اندیشید. کوره نخست آقای ویلسن، یک بوته سوراخدار بود. آند عمودی آن هم پایین و بالا می رفت. بزودی، پس از گذشت پنج یا شش سال، کوره های بسیار گوناگونی، که پیوسته یا گسسته کار می کردند، برای این تولید انطباق داده شدند. این کوره ها اصولاً برای تولید صنعتی آلومینیم ساخته می شدند، مثل

کوره‌های ابرو و کورهٔ زیمنس و هالسکه و غیره.

استیلن: استیلن که پس از بررسیهای برتلو در سالهای ۱۸۵۲ - ۱۸۶۳ بخوبی شناخته شده، و تا آن زمان یک ترکیب آزمایشگاهی مانده بود، در پرتوگرمای برق بسرعت به یک فراوردهٔ صنعتی تبدیل شد. با داشتن کاربید کلسیم، در واقع وسیلهٔ ساخت آسان آن در هرجا با وسیله‌ای نسبتاً ساده وجود داشت و از میان همه کربیدهای فلزی، کاربید کلسیم نخستین کربیدی بود که تولید آن در مقیاس صنعتی شد. قدرت روشن‌سازی آن را آقای برتلو تأکید کرده است. برای اثر دادن آب روی این کربید، دستگاههای متعددی ساخته شدند و در همان حال کوره‌های گوناگونی جهت تهیه کربید آن. تنظیم مقدار آن برای پرهیز از تولید زیاد، که خطر ترکش وسیله در اثر بالا رفتن فشار را داشت یک مسأله بود. این دستگاهها نخست به‌عنوان واحدهای بسیار بزرگ مجهز به یک کنترل‌گاز برای تغذیهٔ یک دستگاه ثابت یا قابل حمل طرح‌ریزی شدند. شرکت‌های راه‌آهن بزودی برای روشن کردن واگنهای مسافران، بدان علاقه‌مند شدند. آنها یا از چراغهای روغن‌سوز مندابی یا نفتی یا از چراغهای گاز شهر استفاده می‌کردند که بیشترین نور را برای واگنهای درجهٔ اول می‌داد. بررسیها و محاسبات گوناگون نشان دادند که با پایین آمدن بهای تولیدی کربید، چیزی که بیش از دو یا سه سال فرصت نمی‌خواست، هزینه چراغهای استیلنی کاهش خواهد یافت.

اما دشواری بزرگی که وجود داشت، خطر ترکیدن دستگاه بود که استیلن یا مشتقات آن، در برخورد با موادی که تماس همیشگی با آن دارند، مثلاً مس، ایجاد می‌کردند. برتلو از خصلت گرماگیری واکنش تشکیل استیلن آگاه بود. او خواص تجزیهٔ انفجارآمیز آن و نیز خواص استیلید مس را بررسی کرده بود. عملیترین راه تهیهٔ این گاز برای کاربرد آن، این بود که آن را تحت فشار در لوله‌های فولادی که بخوبی ساخته شده‌اند وارد کنند. صنعت گاز قابل حمل، گازهای زغال‌سنگ، شیسست یا روغن هنوز بکلی از بین نرفته بودند. استفاده از استیلن به‌جای آنها، بسیار اغواکننده بود. گفت‌وگوهای بسیار تندی دربارهٔ خطرات این طرز خریدوفروش استیلن درگرفت. هوداران استیلن متراکم، حتی مایع شده، برای اثبات اینکه خطرات مورد بحث اهمیت چندانی ندارند لجاجت می‌ورزیدند. حوادثی که ایجاد شده بودند از نظر آنها مربوط به بدی دستکاری، بدی جنس یا ناخالصی استیلن بودند.

خوشبختانه آقایان ژرژ کلود و ا. هس<sup>۱</sup> در اوج این گفت‌وگوها پیشنهاد کردند که از حلالیت زیاد استیلن در استون، برای کم کردن حجم آن، استفاده شود. آنان در فشار ۱۲ اتمسفر مقدار ۳۰۰ لیتر استیلن را در یک لیتر استون حل کردند. با اینکه روشی اغواکننده بود تا سال ۱۹۰۰



شکل ۲۴. چراغ دستی استیلنی.

سمت چپ، میله‌ای جریان آب را روی کاربید تنظیم می‌کند. در نوک لوله سمت راست، چراغ روشن می‌شود.

از پذیرفتن آن خودداری شد. با اینکه پر کردن تحت فشار گازها در سیلندر، کاملاً آزاد بود، امتیاز این روش به ثبت رسید. آقایان برتو و وییی<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۷ نشان دادند که استیلن محلول در اثر فشار، که کلودوهس آن را به‌کار برده بودند، هنوز می‌توانست منفجر شود. شرکت استیلن محلول که از امتیاز دو نفر بالا استفاده می‌کرد عیب اخیر را هم با ایجاد آستری از آجرهای پوک برای سیلندرها و جذب شدن استیلن در آنها، برطرف کرد.

روشن‌سازی با استیلن با سرعت فراوان رواج گرفت و تا پایان دوره بین دو جنگ، یعنی تا زمانی که برق عملاً همهٔ دفاتر کار و محلهای سکونت را روشن ساخت به‌کار گرفته می‌شد. نخستین نمونه‌های چراغهای قابل حمل که بی‌دلیل مشکل ساخته می‌شدند جای خود را به دستگاههای زمخت با شارژ و کار ساده و گذاردند که هر شخص ساده، اعم از کارگر کارگاهها، شخص غیربومی و روستایی با اطمینان کامل می‌توانست از آنها استفاده کند (شکل ۲۴). این دستگاه شامل همهٔ مشخصات چراغ نفتی برای استفادهٔ یک نفر بود درحالی‌که مزیت قابل حمل بودن و نگهداری آسان کاربید و قدرت بسیار زیاد روشنایی را هم داشت. کاربید کلسیم از دههٔ نخست سده بیستم در دکانها هم به فروش می‌رفت.

کارهای طولانی آقای برتو، چهل سال بعد به استیلن هویتی اعطا کرد و توانستند از آن، یک رشته تمام و عملاً بی‌پایان ترکیبات کربنی به‌دست آورند. نخستین ترکیبات این رشته، که لااقل در

آزمایشگاه‌ها به دست آمده‌اند، اجسام سرشناسی هستند که بعضی از آنها در صنعت هم کاربرد دارند، از قبیل الکل یا بنزن، یا ترکیبات متعددی دیگری که ارزش آنها بیشتر سمبولیک است تا اقتصادی، مانند: متان، اتان و غیره. آقای برتو افسانه فلسفی مربوط به نیروی حیاتی را درهم شکست. با دسترسی آزاد به کاربید کلسیم، تکنسین‌ها به امکان آزاد شدن خود از کمبودهای مادی، برای توسعه میدان فراورده‌های خود، با واژگون‌سازی همه روشهای کلاسیک یا سنتی امیدوار شدند. چنین آینده‌ای را تقریباً همه کسانی که در سالهای ۱۸۹۵ - ۱۹۰۰ با استیلن کار می‌کردند نوید داده‌اند؛ اما باید پنجاه سال انتظار کشید تا این رؤیا جامه حقیقت پوشد.

پس از اندک مدتی، روشن‌سازی وظیفه اصلی و صنعتی استیلن شد. آزمایشهایی برای کربن خورانی گاز زغال‌سنگ و کاربرد استیلن در موتورهای درونسوز انجام گرفت. اما واکنش انفجاری، بسیار خردکننده بود.

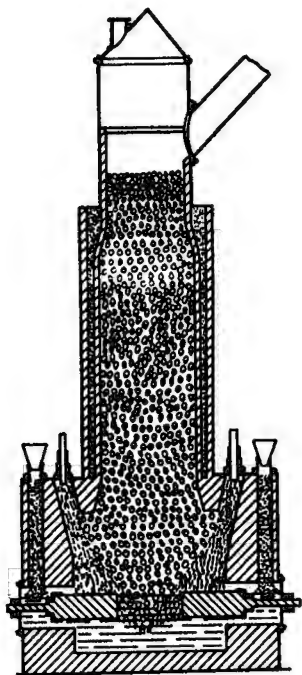
در ۱۸۹۶ آقای هانری لوشاتلیه نشان داد که با سوخت مخلوطی با حجمهای برابر از استیلن و اکسیژن، دمایی در ردیف ۴۰۰۰ درجه ایجاد می‌شود که از دمای مشعل هیدروژنی (اکسیدریک)، ۱۰۰۰ درجه بیشتر است. این کاربرد با اینکه بسیار ساده می‌نمود در استفاده از آن شتاب نشد. مشعلهای گاز شهری و گاز هیدروژن رواج بسیار داشتند. جوشکاری با برق و آلومینوترمی (ترمیت) بتازگی رسم شده بود. مشعل اکسی استیلنی در واقع حدود ده سال به‌کار گرفته شد.

فراورده‌های جدید کوره برقی: گرم کردن با برق جز این برخورد بسیار مهم از لحاظ جهت‌گیری آتی صنایع شیمیایی، در آغاز، تنها در ساخت چند نوع فراورده دارای اهمیت متوسط مربوط به تولید فسفر و سولفور کربن کمک کرد؛ فراورده‌هایی که در آن روزگار با روشهای گرم کردن کلاسیک هم به دست می‌آمدند، و نیز ساخت یک ترکیب تازه، به نام کربید سیلیسیم، که آقای شوتسنبرگر<sup>۱</sup> آن را خالص به دست آورد و برای نخستین بار به طور کامل در سال ۱۸۹۲ مورد مطالعه قرار داد، و پس از وی، آقای مواسان در ۱۸۹۳ همین اقدام را به عمل آورد.

کوره ویژه تهیه فسفر سفید را آقای ریدمان<sup>۲</sup> در ۱۸۸۸ تامس پارکر در ۱۸۸۹ براساس مدل کوره کولز<sup>۳</sup> ساختند و از ۱۸۸۶ در متالورژی از آن استفاده شد. این کوره احیای اسید فسفریکی که سیلیس آن را جابه‌جا کرده بود بوسیله زغال ممکن می‌ساخت.

کاربرد گرمای برقی برای بخار کردن گوگرد این عیب را داشت که ممکن بود با کک موجود در ستون بزرگ عمودی ترکیب شود و الکترودهای زغالی را بشکند. اما در عوض، دارای مزیت گرم شدن آسان بود که باتریهای بزرگ کوره‌های کلاسیک فاقد آن بودند. آقای ر. ی. تیلور که یک

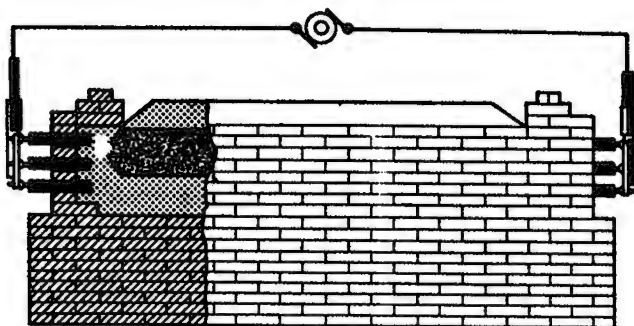




شکل ۲۵. کوره برقی ر. ی. تیلور، برای تهیه سولفور کربن.

قسمت هاشورزده از گل نسوز است که با ورق آهن از بیرون پوشیده شده است. استوانه مرکزی با کک پر شده است، بخارهای گوگرد از میان ککها می‌گذرند. سولفور کربن از بالا، از سمت راست خارج می‌شود. در پایین، چهار الکترود زغالی افقی کار گذاشته شده‌اند، که دو عدد آنها دیده می‌شوند، کوره را گرم می‌کنند. از گلیوهای لوله‌ای، زغال حبه‌ای وارد می‌شود تا الکترودها حمایت شوند. از دو قیف مخروطی، گوگرد را وارد کوره می‌کنند.

صنعتگر امریکایی بود، در سال ۱۹۰۱ راه حل بسیار جالبی برای رفع این اشکال یافت (شکل ۲۵). کار گرم کردن کوره بوسیله چهار الکترود که در یک ظرف استوانه‌ای قرار داشتند انجام می‌گرفت؛ ذوب شدن و تبخیر گوگرد در همین استوانه عملی می‌شد. برای جبران سایش، مقداری حبه‌های زغال هادی از سوراخی که در ظرف ایجاد شده بود وارد می‌کردند. این زغال در نقش مقاومت برقی برای گرم شدن هم عمل می‌کند. گوگرد را از راه استوانه‌های متحدالمرکز در بارگیر و در ستون وارد می‌کنند و بدین ترتیب، از اتلاف گرمای کوره پرهیز می‌شود. در زمانی که مصرف کربید گوگرد رو



شکل ۲۶. کوره برقی آچسن برای ساختن کربوراندم.

به افزایش داشت این روش، نوعی اصلاح مفید بود و ساخت آن نمونه‌ای از کاربرد ماهرانه کوره برقی به شمار می‌آمد.

ساخت کرید سیلیسیم در همان مرحله نخست تحقیقات روی ترکیبات سیلیسیم با فلزات، بوسیله کوره برقی عملی شد. بیشتر این کارها، مرحله آزمایشگاهی نداشتند. در سال ۱۸۹۲ تولید صنعتی کرید سیلیسیم در کارخانه‌های نیاگارا فالز شروع شد. قدرت ساینده‌ای آن از سنباده آهن و جواهر بیشتر و هزینه تولید آن نیز که نسبتاً کم بود موفقیت بازرگانی آن را تضمین می‌کردند. این فراورده بی‌درنگ با نام کربوراندم به فروش رسید که نتیجه ترکیب دو واژه کربن و (کورندون) بود. آقای ا. گ. آچسن<sup>۱</sup> که مبتکر این فراورده بود نخست از وسیله بسیار ساده‌ای استفاده کرد: دیگی آهنی که داخل آن پوششی از کربن هادی داشت و با مخلوطی از رس و کک آن را پر می‌کرد و الکترودی از زغال در آن غوطه‌ور بود. کربوراندم را به شکل بلورهای آبی و درخشانی که دور الکترودی عمودی جمع شده بودند به دست می‌آورد. آچسن بعدها یک کوره با مصالح بنایی طرح کرد که بسیار صاف و طویل بود، مقطعی چهارگوش داشت. الکترودها روی هریک از اضلاع کوچک نصب شده بودند (شکل ۲۶). او در محور این کوره یک هسته گرافیتی قرار داده بود تا برق جریان داشته باشد. آچسن، در آغاز می‌پنداشت که کربوراندم یک کرید آلومینیم است. وی در تلاش برای بهتر کردن خصوصیات آن متوجه شد که اگر به جای آلومینیم از سیلیس، یعنی ماسه استفاده کند بهتر است، و به مخلوط خود نمک دریا افزود تا جریان برق آسانتر شود و نیز مقداری خاک اره برای اینکه جرم، متخلخل بماند تا گازهای تشکیل شده (CO) فرار کنند. به دنبال این کارهای

۱. Acheson ادوارد گودریچ ۱۹۳۱ - ۱۸۵۶ مخترع امریکایی

بر آن شد تا منظمأً در حدود ۱۰۰۰ تن در سال در حوالی ۱۹۰۰ به تولید کربوراندم بپردازد. در این دوره صنعت کربوراندم در اروپا ایجاد شده بود و در فرانسه، آلمان و اتریش، تولید آن هنوز کم بود. از این فراورده بی‌درنگ برای پرداخت فلزات و کار روی الماس و شیشه و تیز کردن ابزارها استفاده شد. چند سال بعد آن را به‌جای فروسیلیسیم برای ساختن ابزار تراشکاری به‌کار بردند. پیش از اینکه سده پایان یابد روش گرم‌سازی با برق برای پخت شیشه به‌کار گرفته شد. نخستین ثبت این امتیاز در سال ۱۸۸۱ در آلمان انجام گرفت اما روش آن که عبارت بود از ریختن گرد مخلوط روی پارچه‌ای از پلاتین که با برق گرم می‌شد، در مقیاس صنعتی نبود. باید گفت که باز در آلمان بود که نخستین کوره‌های قوسی را طرح کردند که نتایج آن خیلی رضایتبخش نبود. به‌کارگیری شمعه‌های بابلوچکوف به‌جای الکترودهای معمولی حدود سال ۱۹۰۰، نیز تکنسین‌ها را مأیوس کرد. همه کوششها، کند، دشوار و یأس‌آور بودند. نتایج اولیه‌ای که در ۱۹۰۴ به‌دست آمد به ذوب سیلیس مربوط می‌شد که بعدها در ساخت پوششهای مقاوم در برابر مواد شیمیایی برای ظرفهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، رویهم‌رفته شاخه‌های متعددی از صنایع شیمیایی کم‌کم، و با کمی تأخیر از صنعت متالورژی، از گرم کردن با برق استفاده کردند. اما از سال ۱۸۹۲ در برق، وسیله کار جالبی برای ایجاد روشهای تازه تولید یافته بودند.

### صنعت کوچک معدن

طی پنجاه یا شصت سال، تحول و تنوع روشهای گرم کردن در صنایع شیمی با روشهای سنتی میراث سده‌های پیش، به شکل واقعی بریدند و امکان بهتر کردن مصالحی که تا آن زمان به‌کار گرفته نمی‌شدند، و نیز تکثیر شاخه‌های تولیدی و تهیه فراورده‌های جدید بی‌شمار برای صنایع دیگر فراهم آمد. این اجسام از پایان سده هجدهم شناخته، یا اینکه در نیمه نخست سده نوزدهم، همچون عناصر ید و برم کشف شده بودند. این دو هالوژن به‌عنوان مثال سرعت وارد فراورده‌های صنعتی شدند که در داروسازی برای نخستین‌بار، با یافتن کاربرد زیاد برای تهیه صفحات حساس عکاسی، در مراحل ساخت مواد رنگی آلی و ترکیبات صنعتی بسیار گوناگون به‌کار گرفته شدند. مواد معدنی دیگری، بیشتر از نمکها یا اکسیدهایی که صرفاً فراورده‌های آزمایشگاهی بودند عوامل توسعه فراورده‌هایی شدند که نتیجه پیشرفتهای صنایع دیگر بودند. گاهی به این اجسام تنها در اندازه‌های بسیار کم نیاز بود، در جنب تنها اسید و ترکیبات قلیایی؛ اما بعضی از آنها برای تغییر شکل زندگی میلیونها نفر کافی بودند.

کاربرد خاکهای کمیاب: یکی از نمونه‌های بسیار جالب از این لحاظ، کاربرد اکسید توریم برای افزایش قدرت روشن‌سازی توری چراغهای گازی است که در سال ۱۸۸۵ آقای آوژفون ولسباخ آنها را اختراع کرد و چندین سال برای تکمیل آن کوشید. آقای آوژ، نخست از نیترات لانتان و زیرکونیم یا ایتیریم استفاده کرد. ترکیب خاکهای کمیاب را در سال ۱۷۹۴ آقای گادولین<sup>۱</sup> کشف کرده بود و بیست سال بعد آقای برزلیوس. بیشتر آنها را توانستند از راه دشوار تبلور جزءبه‌جزء به حالت خالص به‌دست آورند. زمینه این توریها، نسجی آغشته به محلولهای نمک بود که شکل لوله به آن داده بودند و برای اینکه جز یک اسکلت معدنی متشکل از اکسیدهای فلزی باقی نماند آن را تکلیس می‌کردند. به‌جای این اکسیدها چند سال بعد، اکسید توریم را به‌کار گرفتند که از خاکهای موجود در برزیل و کارولینای شمالی، موناژیت استخراج می‌شد. این آمیزه‌ای از فسفات و تیتانات سریم، دیدن، لانتان و توریم بود که تنها ۵ تا ۶٪ اکسید عنصر اخیر در آنها یافت می‌شد. در سال ۱۸۹۵ بهای یک کیلوگرم نیترات توریم حدود ۲۵۰۰ فرانک تثبیت شده بود و دو سال بعد تا ۷۵ فرانک بهای آن پایین آمد.

سرعت دست یافتن به چنین کاهشی، نشانه ظرفیتهای صنایع شیمی در حل مسائل دشوار آن زمان بود. استخراج اکسید توریم مستلزم یک رشته عملیات انحلال، تراسب، تکلیس، تصفیه و غیره بود که اقتصاد کلی آن نمی‌توانست در محدوده، رضایتبخشی از نظر بازگانی انجام گیرد مگر اینکه بپذیریم که در اواخر سده نوزدهم وسایل موجود، گوناگون و انعطاف‌پذیر بودند. می‌بایست این نکته را در نظر داشت که در همین نیم سده، در کلیه فراورده‌های شناخته شده سنتی یا نوآوری شده بوسیله تکنسین‌های آن زمان، نتایج مشابهی به‌دست آمده بود. طبیعی است که گوناگونی وسایل مطرح شده گرم کردن، تنها عامل این رونق نبود. آنان متوجه این نکته بودند که تحول این وسایل، تعیین‌کننده ساختار آن بخشی از صنعت است که نیازهای عملیاتی را تأمین می‌کند که پیش‌نیاز یک کار بنیادی در همه رشته‌های شیمی است.

### تحول این صنعت بزرگ

این رشته صنعتی در جریان تحول خود با گوناگونی کوره‌ها، دیگهای بخار، ستونهای تبخیر و غیره مشخص می‌شود. در سالهای ۱۸۴۰ - ۱۸۶۰ بیشتر خصلت پیشه‌وری خود را که در دهه‌های پیشین با وجود راه افتادن صنایع بزرگ شیمیایی، معدنی و غیرمعدنی هنوز حفظ شده بود از دست دادند. این صنعت، مرحله تولید در صورت تقاضا در خود مؤسسات شیمیایی را پشت سرگذاشته

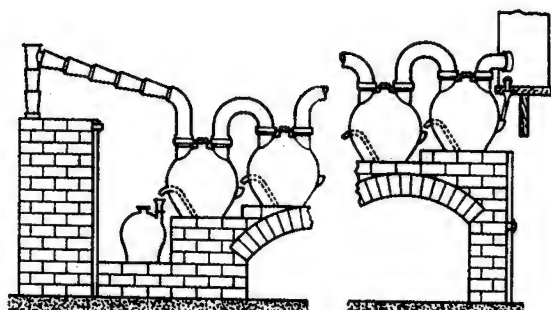
1. Gadolin

بود یا اینکه واسطه‌هایی با دستکاری وسایل دیگر، در پی انطباق دادن آنها با نیازهای شیمی‌دانها باشند. زمانی که مواد خام مورد نیاز و مایعات ظرف به ظرف شوند، فرآورده‌های آماده برای تحویل و انتقال به وزن‌ها و حجم‌های چشمگیری رسیدند و دلایل متخصص این کار پرورش یافتند، یک رشته ساخت مصالح صنعت شیمیایی بسرعت شکل گرفت. با آغاز دو دهه پایانی این سده، گسترش آن شتاب یافت. این صنعت از کارشناسان صلاحیت‌داری برخوردار شد و از همه منابع صنایع سفالگری و مصالح نسوز، متالورژی و مکانیک کمک گرفت. انگیزه این پدیده، طبعاً ترقی صنعت بزرگ شیمی و گسترش صنایع کوچک آن بود. اما بدون آن‌هم، این پیشرفت‌ها نمی‌توانستند ایجاد شوند. در اینجا ما با تکرار آن پدیده‌ای روبه‌رو می‌شویم که در حدود یک سده پیش به تولید انرژی بوسیله ماشین بخار، تحول سیدرورژی و مراحل نخستین کارهای مکانیکی مربوط می‌شود. نمونه‌های دیگر آن، بعدها تولید برق صنعتی و پس از آن، صنعتی شدن الکترونیک است.

سفالگری و سرامیک صنعتی: در رشته صنعت شیمی، وسایل ساخته شده باید از یک خطر بسیار ویژه - خوردگی موادی که از آنها ظرف، لوله یا وسایل نگاهداری می‌سازند - مصون باشند. این مواد، فراوان و اغلب ارزان بودند: رس سفالگری، چدن، سرب، اما در مواردی ناگزیر از به‌کارگرفتن پلاتین بودند که بهای بسیار گزافی داشت. اشکال کار این صنعت، ساخت شکل‌ها و حجم‌هایی با اطمینان از آییندی و استحکام لازم بود.

همراه با صنایع اسیدها، سفالگری و سرامیک با کاربرد صنعتی، پیشرفت چشمگیری داشتند. آنها از همه وسایل لازم، از آن میان، مکنده‌ها، تلمبه‌ها و بادپن‌ها کمک گرفتند. علت موفقیت این بود که این تجهیزات را توانستند برای استفاده از روشهای جدید اصلاح کنند و نیز ظرفیت آنها منظمأ افزایش یابد.

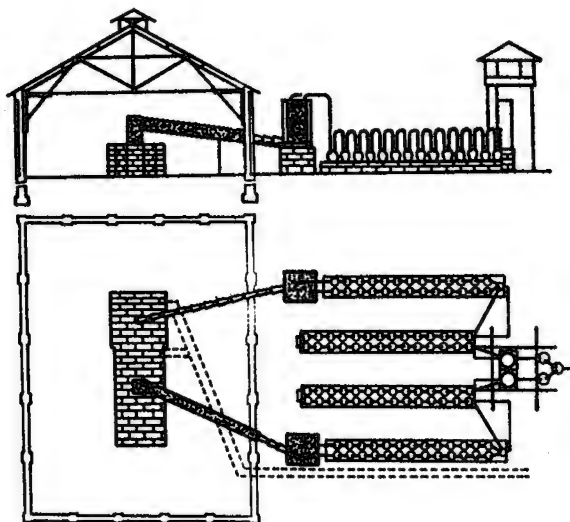
ردیف قربه‌ها با لوله‌های فرار بخار، حباب‌سازها و لوله‌های رابط با اشکال گوناگون و ترتیبات لازم مناسب هر کار طرح‌ریزی شدند (شکل ۲۷). آنها را در کارگاه‌های اسیدنیتریک، اسید کلریدریک و کلر و برم قرار داده بودند. برای تهیه این مواد، لااقل سه ماده نخست، روش‌ها تحول جزئی یافته بودند و بویژه از واکنشهای بنیادین جابه‌جا شدن بوسیله اسید سولفوریک، که از گذشته‌ها، تنها روش عملی بود دورنشدند. بریدن از سنت تا سده بیستم، تا دوران بین دو جنگ جهانی و عمومیت یافتن الکترولیز و روشهای سنتزی انجام نگرفت. بنابراین، بخصوص مهارت در کار کردن با وسایل موجود، موجب کارایی بیشتر تجهیزات برای افزایش تولید می‌شد.



شکل ۲۷. باتری تغلیظ اسید نیتریک از سرامیک صنعتی.

سمت چپ، دیگ جابه‌جایی اسید نیتریک از نیترات بوسیلهٔ اسید سولفوریک. سمت راست، برج میعان پر از کک و سنگ چخماق که آب از بالا به پایین آن سرازیر است. بخارهایی که از دیگ خارج می‌شوند در قرابه‌ها از چپ به راست اسید را هم می‌زنند. سیفون‌هایی مایع را از راست به چپ جریان می‌دهند. اسید بازاری با غلظت ۳۶ درجهٔ بومه.

دشواریه‌های اسید نیتریک: واکنش اسید سولفوریک بر نمکها همیشه در دیگهای چدنی عمودی که در بنایی از مصالح ساختمانی، بالای آتشدان گذاشته می‌شد انجام می‌گرفت. گازهای سوختی در دودکشهای جریان داشتند. روشهای معمولی، اسید نیتریک نسبتاً رقیق ۳۵ تا ۳۶ درجهٔ بومه تهیه می‌کردند. تراکم بخارها و نیز تغلیظ احتمالی این اسید، مشکلات سختی پدید می‌آورد. مذتهای بس درازی کوشیدند تا با افزایش شمار قرابه‌های حباب‌ساز و با اتصال انتهای این ردیف قرابه‌ها به یک برج میعان، ساخته شده از سفال، پر از کک یا سنگ چخماق این مشکلات را برطرف سازند. ترکیب بخارهای نیترو، بسیار پیچیده و متغیر بود، کیفیت اسید بستگی به طرز کار دستگاه داشت. آقای والانتینه<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۲ پیشنهاد کرد که عملیات در یک خلاء جزئی حدود ۱۱۰ میلیمتری که با یک دَم آبی ایجاد می‌شود انجام گیرد. نیترات خشک شده و اسید سولفوریک ۶۶ درجهٔ بومه را به کار گرفتند. طرح والانتینه سرعت تکمیل و وسیعاً مورد استفاده قرار گرفت. در همان دوران روشهای دیگری را آقایان گوتمان<sup>۲</sup>، دیترله<sup>۳</sup> و رورمان<sup>۴</sup> برای تهیهٔ اسید نیتریکی که بدون ناخالصیهای معمولی، بویژه اسیدهای هالوژنی ناشی از ناخالصیهای نیترات باشد مطرح کردند. این روشها شامل گذراندن بخارهای نیترو از ردیف پیچیده‌ای از لوله‌های عمودی یا مایل یا از ماریپیچی از خاک رس بود که اتصالات متعددی با یکدیگر دارند و دمیدن جریان هوا در همهٔ دستگاه، بعدها،



شکل ۲۸. تجهیزات سرامیکی برای ساخت اسید کلریدریک.

برشهای عمودی و افقی، سمت چپ، کوره سولفات ( $\text{NaCl} + \text{SO}_4\text{H}_2$ ) با دیگ (در بالا روی برش افقی دیده می شود) و قشر آهکی. هر باتری شامل: یک برج شست و شو، ۵۰ قوابة ۳۰۰ لیتری و یک قوابة ۵۰۰ لیتری، و یک برج میعان است.

در جنگ جهانی اول در جهت مقاصد نظامی، تجهیزات تغلیظ را به جای خاک رس یا سرامیک از کوارتز ساختند.

ارزشیابی اسیدکلریدریک جذب بخارهای اسید کلریدریک، باز در ردیفهایی از قرايه ها، مشابه قرايه های اسید نیتريك عملی می شد. اما در این باره هم ترتیبات پیچیده ای نظیر وسیله سلاریوس<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۹ طرح شد که گویا زیاد رواج نیافت اما ضمناً گویای مهارت سازندگان سفالگران صنعتی بود (شکل ۲۸). اسید کلریدریک در آغاز، چنانکه دیدیم، یک فراورده جانبی مزاحم در ساخت سود لوبلان بود.

در این جا به صنعت سود باز نمی گردیم. تنها به خاطر می آوریم که پیوسته در تحول بوده است؛ نه تنها از جنبه اصول اساسی تهیه کربنات سدیم - گذر از روش لوبلان به روش سلوی - بلکه همچنین از نظر گوناگونی فراورده هایی که از آن ساخته و وارد بازار می شدند. نامهای فراورده های بازاری، که با روشی کاملاً تجربی ساخته شده بودند در زبان صنعتی و بازاری هنوز هم باقی مانده اند.

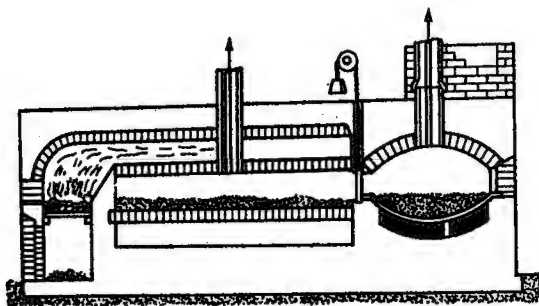
هرچند که این فرهنگ بقدر کافی از یاد رفته می‌نماید، هر اصطلاح دلالت، اگر هم نه به‌طور پیوسته، لااقل بر زمان معینی می‌کند و بر فراورده‌های کاملاً آشنای مورد نظر اشاره دارد. در آغاز تنها مخلوط‌های کربناتی جامد یا مایع مورد نظر بودند، سوزان یا ناسوزان. اما پس از ۱۸۵۰ بود که ساخت سودسوزان بر پایهٔ روش آقای ویلیام گوسیج شروع شد. هیچ چیز پیچیدگی شبکهٔ تولیدها را دربارهٔ سود لوبلان و مواد سفیدکننده بهتر از کتاب ژرژ لئونز نشان نمی‌دهد. این کتاب در پایان سالهای ۱۸۷۰ در سه زبان با عنوان: *Traité théorique et pratique de la fabrica-tion de la soude et de ses branches collatérales* سراسر به رشتهٔ صنعتی شیمی معدنی سنگین مربوط می‌شد.

آقای گوسیج در سال ۱۸۳۶ امتیاز انحلال اسید کلریدریک فراری از کوره‌های تولید سود لوبلان را که منظور اصلی آن ساخت سولفات سدیم برای تبدیل آن به کربنات سدیم بوسیلهٔ زغال و کربنات کلسیم بود به ثبت رسانید. اما می‌بایست سی سال بگذرد تا روش میعان در سایهٔ تجهیزات سنگین سفالگری و سرامیک‌سازی عملی شود.

اسید کلریدریک در پایان سده به یک فراوردهٔ صنعتی پرمصرف تبدیل شده بود، آن‌هم در دورانی که تولید سود بروش لوبلان در برابر روش سلوی واپس می‌نشست. استفاده از کوره‌های بازتابی که روی کف آن قشر آهکی متحمل پخت دوم می‌شد و سولفات اسید، تبدیل به سولفات خنثی، و پخت نخست در دیگی چدنی یا سربی انجام می‌گرفت که گازها از ته دودکش از روی آن می‌گذشتند ادامه داشت (شکل ۲۹). از کورهٔ موفلی دارای دیگ نیز در همان زمان استفاده می‌شد. کورهٔ اخیر نیز مانند کوره‌های پیشین، همزنی و مواظبت از تودهٔ گرم را لازم داشت. کاری که با دست کارگران انجام می‌گرفت. باز می‌توان گفت که در سالهای ۱۸۸۰ - ۱۸۹۰ نخست در انگلستان و آلمان شمار زیادی کوره‌های گردان وارد میدان شدند. نوع بسیار رایج این کوره‌ها، طرح آقای مک ایر<sup>۱</sup> بود (شکل ۳۰). این کوره یک کف چدنی گردان داشت که چند همزن عمودی به شکل چنگال، که حول محور عمودی خود نوسان داشتند بالای آن کف معلق بودند. این کف، قشر آهکی را جابه‌جا می‌کرد. مخلوط نمک‌هایی که در ظرفی در بالا پخت نخست را تحمل کرده بودند روی این کف، ریخته می‌شدند؛ اسید سولفوریک و نمک دریا نیز پیوسته وارد آن می‌شد. اطاقک باز تابنده‌ای که از مصالح ساختمانی بود آتشدان و کف کوره را در خود می‌گرفت.

آقایان هارگریوز و رابینسون در سال ۱۸۷۲ اندیشیدند که گاز سولفور، اکسیژن و بخار آب را مستقیماً روی نمک دریا اثر دهند. آنان در این روش از طرحی مشابه طرح آقای سلوی برای ساخت

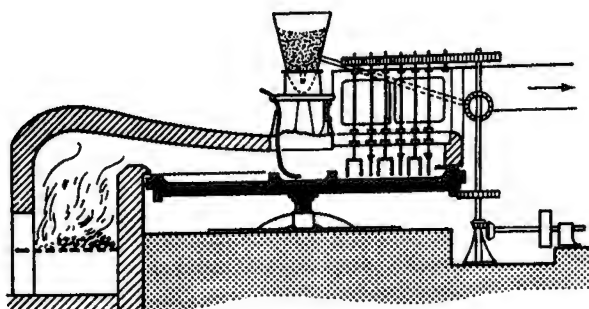




شکل ۲۹. کوره بازتابی برای ساخت اسید کلریدریک.

پخت اول در ظرف سمت راست انجام می‌گیرد. فراورده حاصل از سوراخی روی قشر آهک ریخته می‌شود تا پخت دوم سولفات اسید انجام شود.

کربنات دو سود الهام گرفته بودند (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۷۹۷). اساس کار، اثر دادن بخارها روی فراورده‌ای جامد یا مایع (در مورد روش سلوی) بود. واکنش هارگریوز در یک ردیف یا ده‌تایی ستون چدنی انجام می‌گرفت که در یک بلوک از مصالح ساختمانی قرار داشتند. این ستونها دارای آستری از آجرهای کلورسیدیم بودند و گاز سولفورویی که از کوره‌های پیریت می‌آمد از آنها می‌گذشت. تجهیزات مربوط به میعان هیچ تغییری نکردند.



شکل ۳۰. کوره بازتابی با کف گردان، ساخت مک‌ایر.

سمت چپ، آتشدان کوره بازتابی. سمت راست، مکانیسم حرکت کف گردان و همزنهای مکانیکی. اسید سولفوریک از یک لوله سربی به مرکز کف کوره می‌ریزد. در اینجا نمک دریا از قیف مجهز به پخش مکانیکی روی آن ریخته می‌شود. اسید کلریدریک از لوله بالا، سمت راست خارج می‌شود.

کلر ارزان: کاربرد اصلی اسید کلریدریک، تهیه کلر بود که تا آن زمان برای واکنش کلاسیک شله انجام می‌شد: اکسایش بوسیله دیوکسید منگنز. این واکنش در ظرفهای سنگی دارای زبانه سربی برای خارج شدن کلر و مقداری ماسه سنگ برای ورود بخار آب به‌عنوان گرم‌کننده انجام می‌گرفت. زمانی‌که با روشی غیر از لوبلان، اسید کلریدریک را وارد عمل نمی‌کردند و واکنش اصلی را به‌کار می‌گرفتند، نمک دریا، دیوکسید منگنز، اسید سولفوریک، عملیات را در دیگهای چدنی انجام می‌دادند. جذب اسید آزاد شده مستلزم ظرفهای بزرگ خاک‌رسی بود. مسئله اساسی برای اقتصادی بودن این فرآیند، در هر دو حالت، باز همان بازیابی دیوکسید منگنز از سولفات تشکیل شده، بود. آقای ولدن در سال ۱۸۶۸ راه‌حلی پیشنهاد کرد که برای عمل آوردن باقیمانده با کربنات کلسیم بود تا بدین‌ترتیب، اسیدسولفوریک و ناخالصیهای دیگر حذف شوند، سپس آهک کشته می‌زنند و هوا را از روی آن عبور می‌دهند. طرز کار را خود آقای ولدن پس از بررسی شیمیدانهای متعدد، از جمله آقای لوتز، تکمیل کرد تا نوع و ترکیب مخلوطهای مختلف را که در هر مرحله با آنها برخورد می‌شود تعیین کند. ولدن بویژه به‌جای آهک، منیزی را به‌کار برد. در واقع وی با وجود اطلاعات به‌دست آمده، همیشه با روشهای نیمه تجربی کار می‌کرد و موفقیت او مرهون مهارت کارگرانش بود. بعدها نام روش ولدن به مجموعه کارهایی داده شد که از اسید کلریدریک و دیوکسید منگنز آغاز می‌شود و تا بازیابی این دیوکسید پیش می‌رود.

طبیعی است که برای حذف دخالت دیوکسید منگنز، یعنی ماده‌ای که نسبت به مواد دیگری که وارد واکنش می‌شوند، گران است، بکوشند. خواهرزاده آقای تنانت در کارخانه‌ای در گلاسگو به‌جای دیوکسید از نیترات سدیم استفاده کرد. همچنین لازم بود که ستونهای واکنش دو آجری به‌کار گرفته شوند. این اصل با چند اصلاحی که در آن وارد شد در آلمان مدتها رواج داشت. کمی بعد، حدود سال ۱۸۷۰ آقایان دیکن<sup>۱</sup> و هورتز<sup>۲</sup> اسید کلریدریک را بوسیله جریانی از اکسیژن هوا، مستقیماً تجزیه کردند. آنها متوجه شدند که این واکنش می‌تواند در دمایی نسبتاً پایین، بین ۳۷۰ تا ۴۰۰ درجه در مجاورت نمکهای معدنی نظیر سولفات مس عملی شود. آقای هازن کلور<sup>۳</sup> برای مؤسسه آلمانی رانیا و شرکت پچینی در ۱۸۸۳ تجهیزات ویژه‌ای برای تولید اسید کلریدریک جهت تجزیه آن به کلر به کمک روش بالا طرح‌ریزی کرد. در این قضیه نیز سلسله واکنشها تا مدتها مبهم و تاریک ماند.

تنها ده سال بعد بود که این فرآیند رفته‌رفته شناخته شد. اکسید مس با تغییر شکل خود نخست به کلروکوپورو و بعد کلروکوپوریک به‌عنوان یک عامل کاتالیزور عمل می‌کند. در مرحله دیگری

نیمی از کلر خود را رها می‌کند و به کلرورکوپرواحیا می‌شود و این ترکیب نیز تحت تأثیر جریان هوا، به اکسید مس تبدیل می‌گردد. همین تغییر شکلها نیز در مجاورت سولفات مس انجام می‌گیرند، که پایه روش دیکن است.

همه این روشها با اصلاحات کم و زیادی که طی زمان متحمل شدند- نوشتارهای سالهای ۱۸۸۰ تا ۱۹۱۴ شیمی، فهرست شگفت‌انگیزی از انواع آنها به‌دست می‌دهند- مراحل پایانی تولید شیمیایی اسید کلریدریک و کلر را روشن می‌کنند، مثل مجموعه کارهای مربوط به اسید نیتریک. عوامل تازه می‌بایست بتدریج اهمیت آن را در گذر دومین و بویژه سومین دهه سده بیستم کاهش داده باشند. الکترولیز سبب شد که صنایع شیمیایی از مهارتهای دستی و تجهیزات پیچیده و کارهای غالباً دقیقی مثلاً در ساخت، تقطیر جزء به جزء بخارهای اسید کلریدریک و آب که در یکدیگر محلول هستند آزاد شوند. اکسایش کاتالیزوری آمونیاک دومین عامل تغییر شکل بنیادی این صنعت سازنده اسیدهای ردیف نخست ساختارهای کلاسیکی صنعت سنگین شیمی بود- ساختارهایی که روش مجاورتی تولید اسیدسولفوریک، در آنها شکافهایی وارد آورد.

اسید سولفوریک به روش مجاورتی: تا سال ۱۸۷۰ اسید سولفوریک بی‌آب تنها به شکل سنتی ساخته می‌شد، که روش تخریب خشک در قرعهای سنگی و یتریولی، که معمولاً با شست‌وشوی شیشه‌های پیریتی به‌دست می‌آمد، نماینده آن بود. این اسید که طبق عادت اسید نوردهاوزن نامیده می‌شد و مرکز تهیه آن ساکسونی بود در اواسط سده نوزدهم تقریباً فقط بوسیله ستارک<sup>۱</sup> در بوهیمیا، نزدیک پراگ تولید می‌شد. این کوره سنتی تونلی بود که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گرفت. در ۱۸۷۲ تنها مقدار ۱۷۲ تن اسید سولفوریک در این کوره‌ها ساخته شد. بهای این اسید دودکننده، بسیار بالا بود.

ساخت اسید نوردهاوزن تنها در نزدیکی رگه‌های شیشه‌ای و یتریولی دارای ترکیب مناسب عملی بود. آقای کلمز وینکلر<sup>۲</sup>، در تلاش برای رهایی از این قید، نخست درصدد برآمد که با فعل و انفعال اسیدسولفوریک روی باقیمانده تشویه پیرینها، نوعی مات و تیریولی، به‌طور مصنوعی تهیه کند. تخریب خشک این مات می‌توانست انیدرید سولفوریک تهیه کند تا اسید اطاقهای سربی غنی شوند. لیکن این روش پرخرج بود و نیز باعث آلودگی خطرناک هوا برای گیاهان می‌شد.

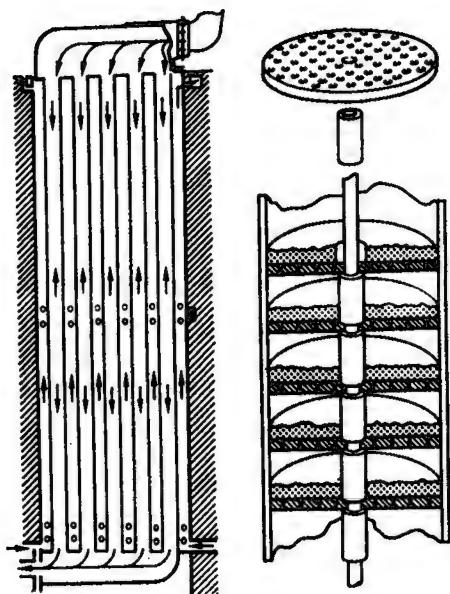
با این حال، با آغاز سالهای ۱۸۶۰ نیتروژندهی ترکیبات آلی مستلزم مقادیر روزافزونی اسید غلیظ بود. وینکلر به آزمایشهای خود برای غنی‌سازی اسید اطاقهای سربی ادامه داد و می‌خواست مستقیماً انیدرید سولفوریک را با اکسایش اسید سولفور در مجاورت یک کاتالیزور، به‌دست آورد.

این واکنشی است که در اطاقهای سربی با تشکیل زودگذر سولفات نیتروزیل انجام می‌گیرد. اما چون سولفات نیتروزیل جز در اثر بخار آب در بخارهای نیترو و انیدرید سولفوریک تجزیه نمی‌شود، اسیدی که به دست می‌آید جز ۶۰ درجه بومه نیست. بدین ترتیب، دشواری کار، انجام دادن این واکنش در بیرون از اطاقهای سربی و با کاتالیزور دیگر است.

وینکلر حق امتیاز یک سرکه‌ساز انگلیسی به نام پرگرین فیلیپس<sup>۱</sup> مربوط به سال ۱۸۳۱ را که هرگز مورد استفاده قرار نگرفته بود خرید. وی مخلوطی از گازهای سولفور و اکسیژن را از لوله‌های شیشه‌ای محتوی پلاتین می‌گذرانید. این لوله‌های کوچک و نازک شیشه‌ای تنها اثری که داشتند تقسیم مخلوط گازها و تسهیل تماس آنها با کاتالیزور بود. وینکلر در مرحله بعد، از پنبه نسوز پلاتیندار به عنوان بخش‌کننده استفاده کرد و کمی بعد دو آلمانی با نامهای هانیس<sup>۲</sup> و شرودر<sup>۳</sup> برای فعال‌سازی این واکنش از افزایش فشار استفاده کردند.

هرچند که این فرآیند از همین دوران، آغاز سالهای ۱۸۷۰ از سوی بادیش انیلین اوند زودا فابریک به کار گرفته شد، دشواریهای بزرگی هنوز بر سر راه تعمیم آن وجود داشت. از نخستین این دشواریها، تهیه گاز سولفور، یا مخلوط گاز سولفور و اکسیژن بود که به آزمایشهای فراوان نیاز داشت. برای دنبال کردن این روش، فکرها شدیداً تحریک شده بودند. اسکوائر مسل<sup>۴</sup> در انگلستان و وینکلر در آلمان، بی‌تردید پیش از آن دو نفر، پیشنهاد کردند که این مخلوط را با تجزیه خود اسید سولفوریک در دمای بالا به دست آورند. بخار آب که حذف شده بود چیزی که می‌ماند جز فراورده تجزیه ایندرید سولفوریک که در اثر کاتالیزور پلاتین از نو تشکیل شده است نبود. این عملیات به علت واکنش همه مواد که با آنها می‌توانستند دستگاهها را بسازند، بسادگی انجام نمی‌گرفت. وانگهی، حذف بخار آب هرگز رضایتبخش نبوده است. وینکلر و نیز تعداد زیادی از شیمیدانها در آن زمان پیشنهاد کردند که تخریب خشک سولفات آهن در دمای بالاتری انجام گیرد. مات مصنوعی این ماده را وی قبلاً برای غنی‌سازی اسید معمولی به کار گرفته بود. اما باز همان دشواریها پیش آمدند. می‌بایست این روش تهیه مخلوط گازی را، که مستقیماً از روشهای سنتی تخریب خشک سولفاتها الهام گرفته شده بود، رها کنند.

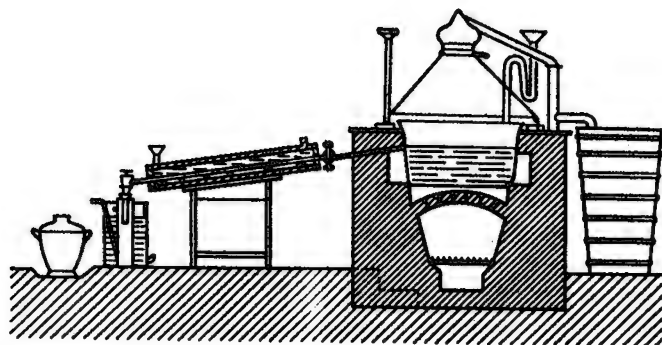
در این شرایط، تصمیم گرفته شد که از گازهای سولفور برخاسته از تشویه پیریتها و از هوا استفاده شود، که دشواری دیگری خود را نشان داد و آن این بود که گاز سولفور باید از ناخالصیها، بویژه ترکیبات ارسنیو، که کاتالیزور را فوراً «مسموم» می‌کند پاک شود؛ و مشکل دیگر، بهای بسیار گزاف پلاتین بود.



شکل ۳۱. ستون کاتالیز.

برای ساخت اسید سولفوریک مجاورتی، سیستم B.A.S.F. مخلوط  $SO_2$  و هوا از بالای ستون، با ارتفاع دو متر، وارد می شود و لوله های کاتالیز را از پایین به بالا می پیمايد. نیمه پایینی این لوله ها با رویهم گذاری صفحات مشبک مجهز به پنبه نسوز پلاتینی تشکیل شده است. گاز  $SO_2$  از پایین مکیده می شود. هوای آزاد از پایین وارد می شود و در لوله های تبادل گرما از پایین تا بالای ستون را می پیمايد و از بالای ستون، به طرف کوره پیریت فرستاده می شود.

با این همه تولید مصنوعی اندیگو، حالا در گرو داشتن مقدار روزافزونی اولثوم بود. مسأله در آزمایشگاه های بادیش انیلین اوند زودا فابریک و دیگر مؤسسات بزرگ آلمان بشدت بررسی شد. سرانجام دشواریهای اخیر هم در سال ۱۸۹۸ بوسیله آقای ر. کنیچ<sup>۱</sup> برطرف شد و کارخانه بادیش انیلین ... تولید انبوه آن را آغاز کرد (شکل ۳۱). نخست این روش تولید اولثوم در آلمان محرمانه ماند. اما در زمان جنگ جهانی اول، نیاز به اولثوم ناگهان افزایش یافت، زیرا برای نیتروژندهی تولوئن و تبدیل آن به یکی از مواد انفجاری بسیار مؤثر به نام T.N.T لازم بود. دیگر کشورهای وارد در جنگ کارخانه هایی برای ساخت آن برپا کردند. دیده شد که این کاتالیزورها می توانند ترکیبات



شکل ۳۲. دستگاه شرکت جانشون - ماتی برای تغلیظ اسید سولفوریک.

دیگ پلاتینی به قطر ۶۵ سانتیمتر، دارای سرپوش سربی. اسید از راه قیف سیفونی وارد دستگاه می‌شود. بخارها در خنک‌کننده سمت راست، مایع می‌شوند. سیفونی اسید غلیظ را در خنک‌کننده سمت چپ جریان می‌دهد.

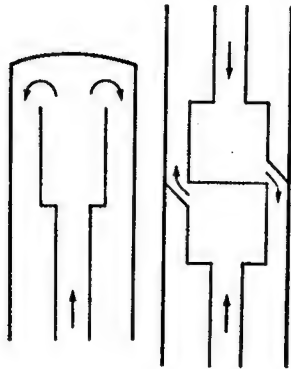
ارزانیهایی، مانند اکسید و انادیوم باشند. در گذر سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ روش مجاورتی جانشینی روش اطاقهای سربی را آغاز کرد و پس از جنگ جهانی دوم، بروش اصلی تولید اسید سولفوریک تبدیل شد.

دشواریهای روش مجاورتی: تولید انبوه انیدرید سولفوریک با روش مجاورتی، از همان مراحل نخستین، امکان حذف مرحله تغلیظ اسید سولفوریک اطاقهای سربی را فراهم ساخت. اسید سولفوریک هم، مانند بسیاری از مواد شیمیایی معمولی دیگر تولیدی صنایع شیمیایی، در بعضی از موارد، رفتارهای بسیار گوناگونی دارد و صنعتگر را گیج می‌کند. در آغاز سالهای ۱۸۸۰ زمانی که نیاز به اسید سولفوریک غلیظ بسرعت افزایش می‌یافت، این صنعت خود را در برابر مسأله دشواری یافت که باید آن را حل می‌کرد. اسید سولفوریک در بالاتر از ۶۳ درجه بومه، سرب یعنی تنها جسمی را که در برابر آن هنوز پایدار بود مورد حمله قرار می‌داد. گرچه نخستین مراحل تغلیظ آن را می‌شد در ردیفی از دیگهای سربی که آستری از ورقهای چدنی دارند انجام داد، دنباله کار، می‌بایست در ظروف شیشه‌ای یا بهتر، پلاتین انجام گیرد (شکل ۳۲). در گذر سالهای پایانی سده نوزدهم، شمار زیادی از وسایل به آزمایش گذاشته شدند که گوناگونی آنها گواهی بر اندیشه مبتکر شیمیدانها و سازندگان آنها بود، و حتی از کارشناسان ساخت وسایل شیمیایی هم استفاده شد. بنابذلیل

گوناگون، شکنندگی در صورت کاربرد ظروف شیشه‌ای، و هزینه بسیار زیاد در صورت استفاده از پلاتین، ظروف تغلیظ را کوچک می‌گرفتند. برجهای تبخیر را که شامل ردیفی از مخزنهای شیشه‌ای بود مایع در آنها پیایی از بالا به پایین جریان داشت، و ظروف پلاتینی کوچک را، فتچانکهایی از سرب روی آنها بود و به‌طور پیوسته کار می‌کردند با یکدیگر تلفیق کردند. همچنین؛ برای دور زدن مشکلات از راه کاهش فشار نیز آزمایشهایی شد، از روشی که آقای کولمن در سال ۱۸۴۴ پایه گذارده بود یا از روش تبخیر با جریان دادن هوای گرم استفاده کردند.

شمار زیادی از این وسایل و روشها به‌طور مؤثری به‌کار گرفته شدند، که بر اهمیت اسید غلیظ و نیز تعداد زیاد مؤسساتی که آن را تولید می‌کردند دلالت دارد. اما در همه این موارد هزینه ساخت وسایل، خیلی سنگین و ظرفیت تولید، بسیار محدود بود. این وضع نشان می‌دهد که روش مجاورتی تولید اسیدسولفوریک، جای خود را به تلاشهایی داده بود که مدتی حدود ۳۰ سال، لجوجانه دنبال می‌شدند. موفقیت در این کار در مرحله تغییر سده، دقیقاً پرش از روی مانعی بود که توسعه این صنعت بزرگ شیمی را محدود کرده بود.

درباره اهمیت این قضیه و این واقعیت که بالاخره پایان رضایتبخشی برای حل این مشکل یافت نشد - زیرا مشکل مربوط به تجهیزات در این روش، لااقل به همان اندازه دشواریهای صرفاً شیمیایی، نظیر کاتالیزور مهم بوده‌اند، هیچ‌گاه حق مطلب ادا نشده است. در واقع تبدیل  $\text{SO}_2$  به  $\text{SO}_3$  تنها در دمای قرمز تیره، به‌طور کمی انجام می‌گیرد و در دمای بالاتر، این انیدرید تجزیه می‌شود. اما واکنش اکسایش  $\text{SO}_2$  گرمای است و نخستین ناکامیها تا اندازه‌ای به‌علت بالا رفتن زیاد دما در لوله‌های واکنش است که برای شروع کارگرم شده‌اند. زمانی که این پدیده بهتر شناخته شد طرح وسایل خنک‌سازی لازم، نسبتاً ساده‌تر گردید. با این‌همه مقداری کارهای آزمایشی با سیستمهای خنک‌سازی از بیرون بوسیله جریان هوا یا یک فلز مایع وجود داشته است. خوشبختانه، می‌توان گفت که تکنیک تبادلگرهای گرما در آن زمان، هم در رشته متالورژی و هم در شیمی صنعتی پیشرفت فراوان کرده بود، و همین تکنیک بود که بهترین راه‌حل را پیشنهاد کرد و آن، گرم کردن دوباره گازهایی بود با گردش در اطاقهای مجاورت وارد می‌شوند (شکل ۳۳). نخستین وسایل به‌کار گرفته شده، بسرعت جای خود را به باتریهای تبادلگر گرما واگذار کردند. این تبادلگرها از حدود سال ۱۹۰۲ برپایه ضوابطی که در نتیجه سالها استفاده از آنها شناخته شده بودند به‌کار گرفته می‌شدند.

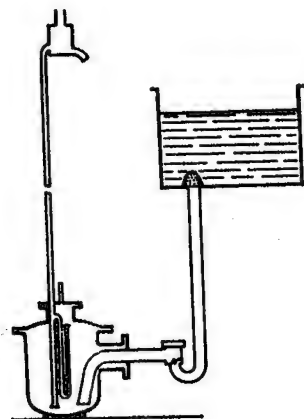


شکل ۳۳. اطاقهای کاتالیز، برای ساخت اسید سولفوریک مجاورتی، سیستم هوخست. مخلوط سرد  $SO_2$  و  $O_2$  در هر دو دستگاه بوسیله گاز  $SO_2$  خارج شونده گرم می شود، بنابراین دما در اطاق کاتالیز، در اثر گرمای واکنش، بالا رفته است.

دانش شیمی و وسایل ساخت: از آنچه گفته شد باید پذیرفت که تحول صنعت سنگین معدن دو جنبه مکمل یکدیگر و لازم را داشته است. تحقیق روشهای تازه چه برای تولید و چه برای پالایش فراورده های ساخته شده؛ تکمیل پیوسته دستگاهها و مصالح کار. مرز میان این دو جنبه غالباً بسیار نامشخص است و از این لحاظ مکمل یکدیگر می باشند. بررسی روشهای جدید به دستاوردهای بسیار اخیر دانش شیمی و تجربه گرایی آزمایشگاه های صنعتی انجامید. کوشش برای خلق ماده ای که پاسخگویی نیازهای مربوط به روشهای تازه باشد با ابتکارهای عملگران رهبری می شد. در همین دوره بود که تعمیم اطلاعات آزمایشگاهی در شرایط ساختهای انبوه آغاز شد. در این کار نظریه پرداز و عملگر غالباً در یک شخص تجسم می یافت؛ گرچه باز هم دو بخش این کار را غالباً اشخاص جداگانه ای انجام می دادند.

دو جنبه این تحول از یکدیگر تفکیک پذیر نبودند، زیرا لااقل نمی شد تعیین کرد که نظریه تا چه اندازه عمل را رهبری کرده، یا برعکس، به دنبال آن رفته است. در مورد ساخت دستگاهها، باید پذیرفت که اصلاح پیوسته آنها شرط اساسی و پیش نیاز کاربرد روشهایی بود که بر پایه واکنشهایی قرار داشتند که تا آن زمان در مقیاس صنعتی عملی نبودند. مثلاً سفالگری و سرامیک سازی، شرایط فنی حکمفرما بر صنایع شیمیایی را تغییر دادند. در پرتو این شرایط، امکانات لازم برای تشکیل یک مجموعه کاری کامل، پیشرفت زیادی کرد. نه تنها قرابه ها، خمره ها دیگها، لوله ها، ماریپیچها، اجزای





شکل ۳۴. تلمبه تپنده یا تلمبه اسید لوران.

کار این وسیله بر پایه کوبش آبی (ضربه قوچ) است. اسید از مخزنی در سمت راست وارد یک ظرف چدنی می‌شود. سطح مایع بالا می‌رود و هوا را متراکم می‌کند. زمانی که مایع به دهانه سیفون می‌رسد، هوایی که در لوله کوچک سرپوش متراکم شده است اسید را در لوله بالا رونده برگشت می‌دهد و در همین زمان دریچه مجرای ورود، بستنی بسته می‌شود.

برجها و ستونهای میعان یا جذب، که غالباً براساس مقررات ثابتی ساخته می‌شدند، طرح و ساخت آسان همه وسایل لازم و نیز تغییر دلخواه ساختمان آنها را ممکن کردند، بلکه شماری از وسایل تکمیلی از قبیل: دمه‌ها، مکشها، تلمبه‌های اسید، تلمبه‌های معمولی و تلمبه‌های تپنده (شکل ۳۴). نیز از سرامیک، سفال، سنگ‌ماسه ساخته شد و حل مشکل گردش مایعات و گازهای خورنده را گاهی در مدارهای بسیار طویل ممکن ساختند. روشن است که این وسایل برای کار کردن دستگاهها ضرور بودند و در اثر فشار شرایط جدید ساخته شدند اما باز هم می‌بایست تکنیک در سطحی باشد، که ساخت آنها را بتواند امکانپذیر کند.

برای اینکه درک مشخص از عمق تغییر شکل‌های صنایع شیمیایی در فاصله زمانی ۱۸۵۰ تا ۱۹۱۰ به‌طور تقریبی داشته باشیم، باید همان اندازه که تحول وسایل ساخت را بررسی می‌کنیم به اطلاعات شیمیایی به‌کار گرفته نیز توجه داشته باشیم. تجهیزات ماسه سنگی و سرامیکی تنها عناصر وسایل فنی با مشخصات نوینی را که در این دوره ساخته شده‌اند تشکیل نمی‌دهند. آهن و چدن عنصر بسیاری از وسایل و تقریباً همه آنها، با مشارکت دیگر عناصر بوده‌اند.

در گذشته نمونه‌های چندی از آن بررسی شدند. بالاخره بعضی وسایل مکانیکی که در بالا از آنها سخن رفت: کوره گردان، همزنهای گردان. بسیاری از این دستگاهها یا خاص صنایع شیمیایی بودند از قبیل: فیلتر پرس با ظرفیت زیاد، آسیاهای همزن یا اینکه با این صنایع تطبیق داده می‌شدند: خردکننده‌ها، خشک‌کننده‌های گردان، دستگاههای جذب بخارها یا گازهای باقیمانده. مرور بسیار سریع همه این وسایل به ظاهر فرعی اما در واقع پراهمیت در محدوده این شرح چهره جدید شیمی صنعتی امکان ندارد.

صنعت شیمی پیش از پایان سده نوزدهم، به یاری این وسایل و تکنیک راه‌اندازی آنها و نیز دستاوردهای مکانیک، توانست نه تنها مسائل مربوط به تجهیزات سنگین خود، بلکه حتی، تغییرات این تجهیزات را برای پاسخگویی به نیازهای تولید فزاینده و گوناگون حل کند. بدین ترتیب، نه تنها به حجم تولیدی این شاخه‌های بزرگ و اساسی افزوده شد، بلکه فهرست وسایل و تولیدهای کوچک نیز که گرچه از لحاظ اقتصادی براساس تناژ تولیدی وزنی ندارند، تأثیر آنها در فعالیتهای بخشهای بزرگ بازرگانی و صنعتی روزافزون است، طولیتر شد.

وانگهی، همه صنعت شیمی در شرایطی بود که بدون گذر از مرحله انتقالی وارد فازهای تحول شود، فازهایی که پس از اندک مدتی شاهراه سنتزهای بزرگ صنعتی، نخست ترکیبات نیتروژنی و بعد ترکیبات کربنی را در برابر این صنعت گشودند. در واقع برای فهم تحولی که در سده بیستم دنبال شد باید باز هم یادآوری کرد که این نتایج میوه قابلیت‌های به‌کارگیری وسایلی بوده‌اند که بسیار زودتر از شروع عصر صنعت شناخته شده بودند. بعدها همه این وسایل، سنگینی و شکنندگی خود را از دست دادند و نرم و انعطاف‌پذیر شدند. با آغاز دهه نخست سده بیستم، آلیاژهای فلزات، آهنی و ناآهنی ساخته شدند و فهرست آنها در کمتر از نیم سده تنوع شگفت‌آوری یافت. روشهای ساخت وسایل، بدون اینکه اصول معتبر در سده پیش اکثراً از نو ارزیابی شوند، یکبار دیگر تحول یافتند.



## به کار بردن مواد آلی طبیعی

در همه تاریخ دیرپای صنعت شیمی، کار تغییر شکل فراورده‌های گیاهی یا جانوری برای استفاده در صنعت یا تغذیه وجود داشته است. ساخت رنگهای طبیعی یا ساخت کاغذ از یک سوی ساخت مشروبات تخمیری از سوی دیگر از نمونه‌های بسیار جالب این کار هستند و قرن‌ها سابقه دارند و تنها در این اواخر، در سده نوزدهم بود که تغییر شکل بنیادی یافتند. در مجلد پیش دیدیم که در نیمه نخست سده نوزدهم، رشته‌ای از فعالیت صنعتی بسیار مهم، مثل تهیه قند چغندر و شمعهای استتاریکی ایجاد شد. در جریان صنعت شمع‌سازی و صنعت مواد چرب در دهه‌های میانی این سده، دیدیم که حلال استخراج‌کننده‌ای نظیر سولفورکربن، و ترکیباتی نظیر آن به دست آمدند چه دگرگونیهای ژرفی امکانپذیر شد. تقطیر زغال سنگ نیز از بنیاد نوعی صنعت تغییر شکل فراورده‌های غیرمعدنی بود. پیداست که این چه بازتابی روی ساختار دانش شیمی می‌تواند داشته باشد و دیده شد که چه بازتاب تاکنون بی‌پایانی کاربرد سوخته‌های فسیلی نه تنها بر تنوع شاخه‌های صنایع دقیقاً شیمیایی بلکه بر روی تحول تقریباً همه تکنیکهای صنعتی و حتی فراتر از این، روی خود طبیعت زندگی بشر داشته است.

تحولی برگشت‌ناپذیر: باز هم نیم سده لازم بود تا صناعی که از آنها نام بردیم دارای اهمیت اقتصادی چشمگیری شوند. اما در مدتی که آنها در جستجوی مبانی توسعه خود بودند و زمانی که آن را یافتند به مرحله تازه‌ای از صنعت شیمی غیرمعدنی گام نهادند که پیشرفت آن به شکلی تقریباً پیوسته، در مدتی حدود هشتاد سال، بین سال ۱۸۵۰ و سالهای ۱۹۳۰ - سالهای پیش از جنگ جهانی دوم - ادامه یافت.

پیدایش و شکوفایی تکنیکهای تغییر شکل مواد آلی طبیعی، یکی از پربارترین درسهای نویسندگان تاریخ تکنیک است. این پدیده مدتهای زیادی به سکوت برگزار شد یا اینکه بسرعت از روی آن گذشتند زیرا تحت‌الشعاع حوادثی قرار داشت که بسیار چشمگیر بودند، مانند ساخت گاز روشنائی، سپس تهیه رنگهای مصنوعی، که پیش از رسیدن به صنعت سنتز ایجاد شدند. این حقیقتی است که این صنعت تازه بسیار متنوع است و چنانچه برای تحلیل روشهای کوشش شود و مواد خام به‌کار رفته و فرآورده‌ها را از یکدیگر جدا سازند خود را در برابر انبوهی از جزئیات خواهند یافت که بررسی و شمارش آنها‌کننده خواهد بود. بیهوده در پی ابداع کلیدی هستند که هر بار رشته‌های بزرگ تازه‌ای از فرآورده‌ها را روبه‌راه کرده است. گاهی فرآورده‌های مختلفی با دید شیمی معدنی یا متالورژی، درجه دوم می‌نمایند. اما هرکدام در رشته خود به روشهای تدارکات و مصرف کلاسیک ضربات قاطعی وارد کرده‌اند. مجموع اثرهای آنها تحول برگشت‌ناپذیری به‌وجود آورد که همان‌طور که گفته‌ایم، فراتر از محدوده یک صنعت تنهای شیمی است.

مشخصات این مرحله شیمی صنعتی به دلایل زیر اهمیت کلی دارند. تکنیکهایی که در سایه آنها این مرحله پدید آمد و توسعه یافت، جدید هستند؛ نشان قطع با تکنیکهای سنتی سده‌های گذشته بر آنها مشهود است، که یک تفاوت اساسی با استقرار صنعت بزرگ معدن را تشکیل می‌دهد. این تکنیکها تنها در پرتو سطح بالای محیط فنی آن زمان - طرح و ساخت وسایل پیشرفته شیمیایی برای برآورده کردن نیازهای صنعت معدن، ساخت ماشینهای صنعتی، شکل دادن ورقهای مس یا آهن، تولید و به‌کارگیری بخار برای گرم کردن، و نیروی محرکه ماشینهای بخار - توانستند پیشرفت کنند و بسرعت به مرحله کاربرد رضایتبخشی دست یابند.

یک مجموعه تکنیکی با مشخصات کلاسیکی: انگیزش برای بهبود صنعتی مواد خام جدید، تحت تأثیر دو عامل کاملاً متفاوت، بسرعت قوت گرفت. از یکسوی ارتقاء سطح اطلاعات علمی از این مواد بود؛ از سوی دیگر بازتابهای اقتصادی وسایل جدید حمل‌ونقل، که در آن زمان هم‌گردش مواد خام را آسان می‌ساخت و هم جابه‌جایی کالاهای تمام شده را. در تأثیرهای متقابل این دو

عامل که در این زمینه به طور قطعی بهتر از دیگر زمینه‌های تکنیکهای صنعتی همین دوران به چشم می‌خورد زیاد درنگ نمی‌کنیم.

دیده می‌شود که در خلال سه یا چهار دهه، ۱۸۳۰ - ۱۸۶۰، مجموعه‌ای از وسایل فنی بسیار همگون که عملیات بسیار گوناگونی را ممکن ساخت و هر گروه آن، خود پایه‌گذار یک صنعت خاص بود، به وجود آمد. این وسایل فنی به یکدیگر وابسته بودند و مجموعه آنها تشکیل یک نوآوری یا یک گروه نوآوریهای مستقل از تکنیکهای صنعتی زمان خود را نداده است. امتیاز آنها، همان طور که گفته‌ایم، موادی هستند که این مجموعه آنها را عمل آورد و فرآورده‌هایی که امکان ساختشان را به وجود آورد، غالباً زنجیره‌ای را تشکیل می‌دهند که در خانواده تکنیکهای شیمی معدنی، نساجی و غیره جای می‌گیرند یا با آنها تکمیل می‌شوند. این مجموعه، هیچ‌گونه وابستگی با روشهای سنتی نداشت و سرعت مجموعه‌ای از مشخصات کلاسیکی را تشکیل داد. از این رو، باید پذیرفت که گرچه وسایل و دستکاری آنها طی حدود یک سده دست‌خوش تحول مهمی بوده است هرگز با روشهای پایه‌ای مطرح در آغاز این مرحله، گسستگی قطعی انجام نگرفته است.

بعدها، مثل همه مجموعه‌های فنی با مشخصات کلاسیکی، برای بی‌نتیجه ساختن این مجموعه کوشش شد بدون اینکه فاز دیگری صریحاً اعلام شود چنین تحولی، خشن نخواهد بود. گذر از ساختاری کلاسیک به یک ساختار تحولی، در اثر نوعی گسستگی برخاسته از بلوغ آهسته روشهای نوین انجام می‌گیرد به طور کلی، بحث روشهای صنعت سنتز در میان است که نخستین مقدمات آن در اواخر سده نوزدهم بوده است، گرچه بلوغ کلی، تنها در نیمه نخست سده بیستم بود.

### کائوچو

نخستین کاربردهای آن: صنعتی شدن کائوچو، نمونه خوبی از پیدایش تکنیکهای نوین در یک محیط فنی است که به پیشرفت لازم برای تولد چنین تکنیکهایی دست یافته است. دانشمندان اعزامی به رهبری آقایان لاکوندامین و بوگر به امریکای جنوبی در ۱۷۳۶ کائوچوی خام را به اروپاییان شناساندند. در اواخر سده هجدهم بود که واردات آن در مقادیر کم به انگلستان آغاز شد و آن را به عنوان مداد پاک‌کن می‌فروختند. چندی نگذشت که راههای استفاده از شکل‌پذیری، کشسانی و نفوذناپذیری آن را برای ساختن تویهای بازی، تسمه‌ها برای نواریچی و اتصالات و لوله‌ها یافتند. در همین زمان بود که نخستین دستگاههای همزن صمغها، شست‌وشو و خالص کردن آنها، برش آنها به شکل نوار و سپس به شکل نخ و بالاخره ساختن ورقهایی با کشش آنها طرح‌ریزی شدند. طی دهه

۱۸۲۰، فرآورده‌های کائوچو، گوناگونی خود را شروع کردند و آقای مکینتوش نخستین پارچه ناتروا را اختراع کرد که قرار بود از آن برای ساختن لباس استفاده شود. برای این کار پارچه‌های پنبه‌ای را با مخلوطی از کائوچو و اسانس تربانتین آغشته می‌کرد.

عمل آوردن کائوچو با گوگرد: در سال ۱۸۳۹ آقای هیوارد<sup>۱</sup> متوجه شد که مقدار کمی افزایش گوگرد سبب می‌شود که یکی از معایب بزرگ کائوچو- تأثیر دما روی شکلپذیری و کشسانی آن- کاهش یابد. آقای چارلز گودیر که در امریکا نماینده آقای هیوارد بود، در همین سال به نام خود نخستین امتیاز این روش را، که بسیار مبهم به دست آورد. وی در ۱۸۴۴ زمانی که آقای هنکاک روشی برای آب دادن کائوچو در حمامی از گوگرد مذاب را شرح می‌داد، نتایج کار خود را به طور کاملتری منتشر کرد.

عمل آوردن کائوچو بوسیله گوگرد در آغاز ولکانیزاسیون<sup>۲</sup> اصطلاح شد، که ساخته آقای هیوارد بود و پس از مدت کوتاهی ولکانیزاسیون شد<sup>۳</sup>. با این روش جسمی در اختیار بود که تغییر دما، مشخصات آن را تغییر نمی‌داد. پدیده ولکانیزاسیون توجه شیمیدانها را جلب کرد. بیشتر شیمیدانها کم‌وبیش وابسته به مؤسسات تولید صنعتی کائوچو بودند و این واکنش را در آزمایشگاه بررسی می‌کردند. اینان امیدوار بودند که این صنعت را پیشرفت دهند.

پس از مدت بسیار کوتاهی و بویژه پس از کارهای آقای آنسلم پاین که در ۱۸۵۲ منتشر شد، اطلاعات ارزشمندی از خواص شیمیایی کائوچو و چند نظر اجمالی درباره ترکیب شیمیایی آن به دست آمد. پاین ترکیب عنصری آن را با فرمول  $C_8H_8$  مشخص ساخت؛ اما وضع اتمی آن در آن زمان بسیار مبهم بود، زیرا این فرمول می‌توانست فقط همچون راهنمایی در پژوهشهای صنعتی باشد. تنها پس از کارهای آقای بوشارد<sup>۴</sup> در ۱۸۷۹ بود که ساختار عنصری کربید با دو پیوند دوگانه، ایزوپرن  $CH_2=CH-CH=CH_2$  در ساختمان کائوچو پذیرفته شد. آقای وبر در طی سالهای ۱۸۹۰ تحقیقاتی برای تعیین ساختاری زنجیری انجام داد که در آن ایزوپرن، که در آن زمان فرمول آن را  $C_{10}H_{16}$  می‌نوشتند باید شبکه اساسی را تشکیل دهد. وبر، ترکیب نخستین را  $(C_{10}H_8)_n$  نوشته است تا فرمول کائوچو را نشان دهد. اطلاعات تازه، تنها با تحقیقات شیمیدانهای متعدد، بویژه کارهای اشتاودینگر در ۱۹۲۲، سپس کارهای مییر و مارک که در فصل مربوط به صنعت سنتز درباره آنها سخن خواهیم گفت، به دست آمدند.

باوجود این تردید دراز مدت درباره ترکیب و ساختار کائوچو، صنعت تهیه و تغییر شکل آن بسرعت پیش رفت. شیمیدانها برای اینکه بفهمند که اثر ولکانیزاسیون همانا تثبیت گوگرد روی

مولکول پایه است خیلی تحقیق کردند ولی تنها کارهای تجربی به آنها نشان داد که برای اینکه تثبیت گوگرد پایدار بماند و خواص کشسانی کاتوجو حفظ شود، این تثبیت باید در بخش بسیار کوچکی انجام گیرد.

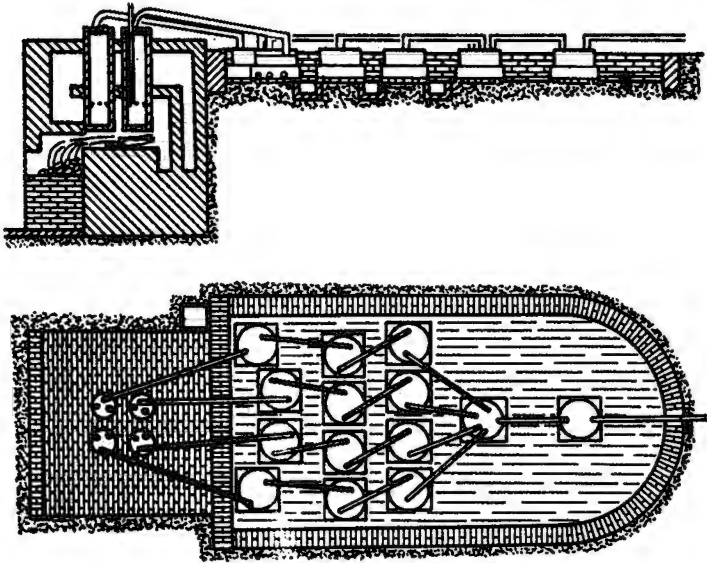
روشهای گودیر و هنگام برای ولکانیزاسیون در گرما منحصر به قطعاتی می شد که شکل گرفته بودند. ولکانیزاسیون در واقع کاتوجوی ناخالص را در خود جوشکاری می کرد. آنها فراورده های تمام شده را در معرض چنین عملی قرار می دادند و آنها را بی درنگ به کار می گرفتند. و ساخت انواع ممکن آنها بشدت بررسی شدند.

سولفورکربن: بهترین نوع آن را آقای پارکس<sup>۱</sup> در سال ۱۸۴۶ کشف کرده بود. به جای کاربرد گوگرد داغ، پارکس اندیشید که از ترکیبات گوگردی که آسان تجزیه می شوند استفاده کند. وی فرو بردن قطعات کاتوجویی را در سولفورکربن مایع سرد محتوی درصد کمی (۲/۵٪) کلرور گوگرد پیشنهاد کرد. در این زمان هر دو ترکیب تنها مواد مورد تحقیق آزمایشگاهی بودند و بهای آنها، علی رغم تهیه سهلشان زیاد بود.

قدرت حلالیت سولفورکربن توجه صنعتگری از ماریسی را به خود جلب کرد. این شخص که دایس<sup>۲</sup> نامیده می شد وسیله ای برای تولید زیاد اندیشید (شکل ۳۵). این وسیله اساساً شامل یک باتری از چهار قیرع استوانه ای بود که عمودی در کوره گذاشته می شدند. در این قیرعها زغال چوب می ریختند و قیرعها را تا حد قرمزی گرم می کردند. سپس، به طور منظم بارهای گوگرد را در آن وارد می کردند که در کف دوگانه می سرید. بخار گوگرد با زغال ترکیب می شد و سولفورکربن از زبانه های بالایی فرار می کرد. بخارها از روی یک ظرف سرد شده می گذشتند که در آن گوگرد ترکیب ناشده رسوب می کرد. سولفورکربن در پایان تقطیر میعان می یافت و سپس خالص می شد.

دستگاه دایس بهبود اقتصادی نسبتاً مهمی از جسم را در پی داشت؛ بهای گوگرد از ۵۰ فرانک برای هر کیلوگرم در ۱۸۴۰ به ۸ فرانک در ۱۸۴۸ پایین آمد. وسایلی که در آغاز کار طراحی شده بودند سرعت اصلاح گردیدند و در ده سال بعد، همین فراورده به ۵۰ سانتیم برای هر کیلوگرم رسید. نوسانهای جریانهای بازرگانی گوگرد را نیز باید به حساب آورد. در واقع، این زمانی بود که عوارض غیرمنطقی مقرر برای گوگرد، صنایع را به عملیات تشویق پیریت ها برای تهیه گاز سولفور در اطاقهای سربی تشویق می کرد. نوعی تغییر مسیر همه را به طمع می افکند و تولیدکنندگان سیسیلی به رها کردن روش سنتی کوره جریانی و روی آوردن به تجهیزاتی که بتوانند بازده و مرغوبیت انواع گوناگون گوگردهای تجارتی را بالا ببرند دست به کار شدند. برای نجات این صنعت در سیسیل، حتی





شکل ۳۵. دستگاه دایس برای تهیه سولفید کربن.

در سمت چپ، کوره‌ای که چهار قرع استوانه‌ای از گل نسوز، با آستری از زغال و گوگرد روی آن قرار دارند. در سمت راست، باتری خنک‌کننده با حباب‌سازی در آب؛ در انتهای این باتری یک ظرف جمع‌کننده مشترک بخار گذاشته شده است. سولفورکربن در ته باتری خنک‌کننده رسوب می‌کند و به بیرون سیفون می‌شود.

به مرمت راهها و تأسیس شبکه راه آهن هم تصمیم گرفته شد.

تولید صنعتی سولفورکربن را آقای دایس برای عمل آوردن باقیمانده‌ها، که آن را گلیسرین قطرانی می‌نامیدند، طراحی کرد و برای این کار صابونی کردن سولفوریکی روغن‌ها و بویژه روغن نخل را پیشنهاد کرد.

وی توانست با استخراج از سولفورکربن، نزدیک به ۲۰٪ اسیدهای چربی را که در گذشته تلف می‌شدند بازیابی کند. این روش بی‌درنگ به استخراج‌های دیگری از همین ردیف انجامید: کتجاله‌های دانه‌های روغنی؛ تفاله‌های عصاره پیه ذوب شده و باقیمانده‌های استخراج موم عسل؛ استخوانهای قصابی؛ روغن موتور سوخته؛ و بالاخره کهنه‌پاره‌ها و وازده‌های تعمیر و روغنکاری ماشین‌ها، بویژه لوکوموتیوها. در مواردی مقدار تولید فرانسه با این روش، از چندین صد هزار تن در

سال بیشتر بود. به‌کارگیری کهنه پاره‌های چرب، دشواری انبار کردن آنها را، که با احتمال خطر و خراب شدن آنها همراه بود، از میان برداشت و مزیت بازیابی همزمان هم پارچه‌ها و هم مواد چرب در آن بود. نوعی تجهیزات کامل با سرعت زیاد برای صنایع دیگر استخراج و تقطیر، انطباق داده شدند. آقای دایس با سرمایه خود چندین کارخانه برپا کرد و شعباتی در فرانسه و خارج تأسیس کرد. قدرت حلالیت سولفید کربن به اجسام دیگری مانند ید، فسفر سفید و گوگرد و کلرور گوگرد گسترش یافت. تهیه این ترکیب نیز ساده بود. کافی بود که گاز کلر روی گوگرد مذاب عمل کند و کلرور به‌دست آمده را با تقطیر، خالص کنند. بدین‌ترتیب، روشی که پارکس برای وولکانیزاسیون سرد کائوچو پیشنهاد کرده بود می‌توانست در سایه همکاری عوامل فن و اقتصاد آن دوره بیدرنگ در صنعت به‌کار گرفته شود.

هوا ناپذیری: در فرانسه صنعتگران متعددی: پرونسل<sup>۱</sup>، گیبال<sup>۲</sup>، ژرار<sup>۳</sup> براین پایه، ساخت فراورده‌های گوناگونی از کائوچوی خالص یا همراه با پارچه - تکه‌های لباس، لوازم جراحی، تسمه‌های انتقال حرکت - را به‌عهده گرفتند. وسایل کار و تغییر شکل آنها، طی ده سال به شاخه‌های متعددی تقسیم شدند: مخلوط‌کننده‌ها، آسیابها، پرسهای برش، نوردها، غلتکهای اطوی پارچه، سنبه‌های روزن‌رانی و غیره. همه این مرحله عریض، چارچوب تکنیکی بود که بعدها صنعت ساخت اجسام پلاستیکی مصنوعی می‌بایست در آن گسترش یابد.

وولکانش سرد بی‌شبهه کلید راه‌اندازی صنعت کائوچو می‌باشد، گرچه وولکانش گرم در گوگرد مذاب، یا مخلوط شدن با نسبتهای متناسب از گوگرد هنوز وجود داشت و اصلاحات متعددی در آن انجام می‌گرفت که از آن جمله کاربرد کاتالیزگرهایی بمنظورهای گوناگون بود. روش دیگری از وولکانش سرد بعدها پیشنهاد شد، در این روش فعل‌وانفعال سولفور هیدروژن بر گاز سولفور، گوگرد تماس آزادی با کائوچو می‌یافت. اما در دوران نخستین گسترش کائوچو، روش مونو کلرور گوگرد محلول در سولفورکربن برای تهیه اشیاء کوچک بسیار به‌کار گرفته می‌شد.

دقیقاً همین روش بود که ساخت لاستیکهای رویی اتومبیل را ممکن ساخت. این لاستیکها طبعاً برای اتومبیلهایی به‌کار گرفته شدند که نخستین نمونه‌های آنها در سال ۱۸۹۰ به فروش رفتند و مجهز به وسایل ساده‌ای - نظیر موتور، مکانیسم انتقال حرکت، فرمان و ترمز، اما بدون شاسی و دسته فرمان - بودند.

کمی پیش از پیدایش وسایل نقلیه موتوردار، لاستیکهای دوچرخه برای تأمین مؤثر توازن این وسیله، اختراع شده بودند. ساخت اولیه این لاستیک، مدیون یک دامپزشک انگلیسی به‌نام جان.

بود. دنلپ است که در اندیشه تعویض لاستیکهای توپر طوقه‌ها (که حدود پانزده سال بود به کار می‌رفت) با لوله‌ای توخالی بود که پیوسته با باد پر شده بوسیله نوار کوچک و چسبنده‌ای روی طوقه ثابت می‌گردید. اگر این لاستیک می‌ترکید می‌بایست همه آن را پیاده کرد و با قبول همه دشواری کار، لاستیک نوی به جای آن گذاشت. چند سال پس از آن، در ۱۸۹۵، آقای آندره میشلن لاستیک توخالی را از کائوچوی نازک (تویی) که با رویه‌ای از کائوچوی ضخیمتر (رویی) حمایت می‌شد، اختراع کرد. این وسیله بی‌درنگ با استقبال زیاد مواجه شد، اما سیستم دنلپ که مناسب‌تر بود، رواج خود را از دست نداد. ناگفته پیداست که در روزگار ما، در سایه روشهای پنچرگیری سریع، تایلر تکی روی به پیشرفت دارد.

ساخت لاستیک تویی و روئی برای دوچرخه، سپس چند سال بعد برای اتومبیلها، بازار تازه‌ای برای صنعت کائوچو فراهم کرد. هنوز اشیائی که از کائوچو ساخته می‌شدند غالباً فرآورده‌های جانشینی بودند و بیشتر بخاطر ارضای حس کنجکاوی ساخته می‌شوند تا کاربرد عملی. برای کاربردهایی که کائوچو ضرور است - لوله‌های گاز خانه‌ها، انواع بالونها، لوازم جراحی - مصرف مواد خام نسبتاً درحد پایین باقی ماند. کائوچو هنوز نتوانسته بود جای مواد مصرفی برای تهیه پوشاک، مواد بسته‌بندی، و ظروف را بگیرد. تنها صنعت پوشاک ناتراوا (امپرمابل)، بازار چشمگیری داشت.

با گسترش سریع دوچرخه از حدود سال ۱۸۹۰، سپس رواج آهسته اتومبیل از سال ۱۹۱۰، صنعت کائوچو اهمیت اقتصادی تازه‌ای یافت. وولکانش سرد برای ساخت لاستیکهای تویی و روئی روشی بسیار عملی بود. در فاصله زمانی ۱۹۰۰ - ۱۹۲۰ تولید لاستیکهای بادی سه برابر شد. ساخت این فرآورده بدین ترتیب گسترش زیاد یافت. اما وولکانش، حلالی را که پس از تقطیر از نو به کار گرفته شود مصرف نمی‌کرد زیرا تثبیت گوگرد برای کلرور گوگرد زیانبخش است. تنها اتلاف معمولی در هر گردش را می‌شد جبران کرد. در سالهای نخستین سده بیستم ساخت گزانتات سلولوز برای تهیه ابریشم مصنوعی، صنعت نوین مصرف‌کننده سولفورکربن را پدید آورد و نیز دسترسی آزاد به این ماده خام، به سود گسترشهای نخستین آن بود.

ایونیت: برای نگاه‌داری خواص کشسانی کائوچو، کار تثبیت گوگرد در مدت وولکانش باید با آهستگی تمام انجام می‌گرفت. کارشناسان نخستین در واقع بیدرنگ متوجه شدند که اگر گوگرد تثبیت شده کمی اضافه باشد، این خواص از بین می‌روند. آقای گودیر از این پدیده در سال ۱۸۴۸ برای تهیه صنعتی فرآورده‌ای سخت، با رنگ تیره، که بتواند مانند شاخ عمل کند سود برد و این فرآورده با نام ایونیت بی‌درنگ به بازار آمد. گویا این نخستین فرآورده جانشینی اشیاء عاج مانند

بود. ابونیت کاربرد خود را در ساخت وسایل برقی، کرسنها و شمار زیادی از اشیا باز کرد. یکی از فواید ابونیت امکان تهیه آن با کائوچوهای خام درجه دوم بود که برای مقاصد دیگری، مستلزم خالص سازی پرهزینه ای می شد. عمل آوردن گرم آن در آب، به دنبال آن، ریش ریش کردن و خمیر کردن امکان می داد که ۵۰٪ وزنی گوگرد در آن وارد شود. بعداً آن را می بریدند، یا در حالت خمیری آن را قالبگیری می کردند و کار و ولکانش در گرمای بخار آب انجام می گرفت. ابونیت علاوه بر حالت شکلی پذیری خود پیش از عملیات نهایی، این مزیت را هم داشت که در برابر عوامل شیمیایی، هوا و آب تحت تأثیر قرار نمی گرفت و در برابر اصطکاک پایدار بود. صنعتگران توانستند با تزریق رنگهای معدنی در جریان عملیات اولیه انواع گوناگونی از آن بسازند.

گوتا پرکا (صمغ مالایا): باز در همین زمینه، یکی از بزرگترین نوآوری این زمان، فراورده ای بود که مانند کائوچو از شیرابه خانواده ای از درختان، با نام Sapotacés به دست می آمد - امولسیون با جرمهای گلوبولی که با عمل آوردن ساده ای برای کلوخه ای شدن به شکل توده سخت و لیفی آماده می شد. گرچه فرمول شیمیایی خام و نیز ریشه آن به کائوچو نزدیک است، گوتا پرکا به علت کمی کشسانی با آن تفاوت دارد.

پزشکی از انگلستان به نام مونتگومری<sup>۱</sup> در بندر سنگاپور، که در سال ۱۸۴۲ به مطب خود در کلکته نقل مکان می کرد، نمونه هایی از صمغ سوماترا (نام مالزیایی سوماترا، پرکا بود) را با خود برد. این صمغ را بومیان آنجا برای ساختن ظروف و دسته اشیا به کار می راند. این ماده تازه در اروپا با استقبال روبه رو شد و از آن برای برقراری شبکه های بزرگ تلگراف استفاده کردند. این ماده بدلیل چکش خواریش در گرما و عایق بودن زیاد، برای روکش سیمهای برنجی آمادگی کامل داشت و در طی سالهای ۱۸۶۰ به جای پیچیدن نخهای ابریشم روی سیمها، (که کاری بسیار رنج آور و پرهزینه بود) از آن استفاده شد. گوتا پرکا، علاوه بر عوامل دیگر، استقرار خطوط زیرزمینی و زیر دریایی تلگراف را ممکن ساخت. حدود سال ۱۸۸۰ که تولید برق صنعتی آغاز شد، گوتا پرکا باز هم کاربرد بیشتری به دست آورد و تا پیدایش عایقهای مصنوعی در آغاز سالهای ۱۹۳۰، عملاً مسؤولیت این کار به عهده آن بود.

یک پدیده انتقال: تاریخ کائوچو و فراورده های مشابه، از چند لحاظ نمونه هستند. نخست نوعی انتقال تکنیک به کشورهای صنعتی، به اصطلاح امروزی از کشورهای عقب مانده به کشورهای پیشرفته در میان است، که یک انتقال غیرعادی است. قطعاً در گذر سده ها و حتی هزاره های پیشین، انتقالهای متعددی از شرق به غرب، از آسیا یا آمریکا به اروپا انجام گرفته است. اما همیشه

بین کشورهای مبتکر و کشورهای دریافت‌کننده ابتکار، حتی اگر نوع تمدن این کشورها، بسیار هم متفاوت بودند، تعادل برقرار بوده است. تا آغاز سده نوزدهم، همه کشورها، اقتصادی اساساً کشاورزی داشتند. مواد رنگ و بعضی از الیاف بافندگی را که کنار بگذاریم، حداقل مبادله در زمان بسیار اخیر، فراورده‌های غذایی از ذرات، قهوه، کاکائو گرفته تا سیب زمینی بودند، که اروپاییها از فراورده اخیر در ربع دوم سده نوزدهم در سایه ماشینیسیم به صنعت نشاسته‌سازی رسیدند.

در مورد پنبه تذکر خاصی لازم است. ریسندگی و بافندگی این فراورده بومی، در نیمه دوم سده هجدهم در بریتانیای کبیر صنعتی شدند. اما پنبه وارد تمدن صنعتی نشد. این یکی از عوامل، اما نه نخستین، راه‌اندازی پدیده صنعتی شدن غرب اروپا بود.

تکنیکهای کاربرد کاتوچو به شکل تجربی بوسیله بومیان امریکای جنوبی و آسیای جنوب‌شرقی بسیار زودتر از اروپا مورد استقبال قرار گرفتند. این تقدم بدین دلیل بود که اروپاییها برای به‌کارگیری آن تأمل داشتند و تنها زمانی آن را مورد استفاده قرار دادند که تکنیکهای خاص صنعتی آن به سطحی عالی دست یافته بودند. آنان این تکنیکها را در تکنیک پیشرفته سده نوزدهم وارد کردند تا مکمل این تکنیک پیشرفته باشد؛ آنان این تکنیک را تغییر شکل و پیشرفت دادند و بر روی این پایه‌های اولیه، یکی از صنایع دارای اهمیت اقتصادی درجه اول سده بیستم را بنا نهادند. عوامل متعددی به سود این دستاورد بودند، که در زمانهای دیگری، مساعد نخواهند بود این عوامل در عین فنی بودن، اقتصادی نیز می‌باشند: دسترسی آزاد به فراورده‌های تغییر شکلی شیمیایی؛ منابع انرژی صنعتی؛ وسایل گرمسازی؛ تجهیزات؛ وسایل حمل‌ونقل؛ کاربرد در صنایع دیگری که بعضی از آنها در صورت نبودن این مواد، پیشرفتشان دشوار بود؛ و توزیع و مصرف فراورده‌های تمام شده به برکت وجود مبانی گسترده بازرگانی. علاوه بر اینها، تنوع کاربردها، خواص شکلی‌پذیری یا کشسانی موادی که با فراورده‌های طبیعی درمان شده‌اند انگیزه‌گرایش به آفرینش مواد جدید: در آغاز مواد صنعتی و بعد سنتزی برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون بود. بعداً خواهیم دید که این صنعت جدید مواد شکلی‌پذیر در چه شرایط و در سایه چه عوامل مساعدی در پایان سده نوزدهم تولد یافت و در سده بیستم از چنان پیشرفت فنی برخوردار شد که در سه دهه نخست این سده، حتی رؤیای آن را هم نداشتند. این پیشرفت همراه با پدیده‌های دیگر نوآوری، بازتاب قابل توجهی بر ساختار تکنیک پیچیده معاصر داشته است.

## سلولوز

کاربرد صنعتی سلولوز، ریشه در گذشته‌های دور دارد و آن ساخت کاغذ از برگ گیاهان است. همان‌طور که می‌دانید، در طول سده‌ها ماده خام اصلی این فراورده، پارچه‌های کهنه کتانی و کتفی و بعد، زمانی که کاربرد پنبه در اروپا فراوان شد، پنبه‌ای بود. با این همه، همیشه گیاهان لیفی را مستقیماً برای ادغام در خمیر پارچه‌های کهنه، زمانی که نیازها زیاد می‌شد، یا برای ساخت انواع مختلف کاغذ به کار می‌بردند. ردیف این گیاهان برحسب منابع گوناگون نواحی جهان: آگاو<sup>۱</sup>، چتایی، نی، کاه، حصیر، شاخه‌های جوان درختان و بوته‌ها بسیار گوناگون بود. مواد جانشینی - جز در بعضی نواحی - تا اواسط سده نوزدهم به مقدار کم به کار برده می‌شدند. در اروپا خمیر پارچه‌های کهنه تنها ماده اولیه صنعتی باقی مانده بود.

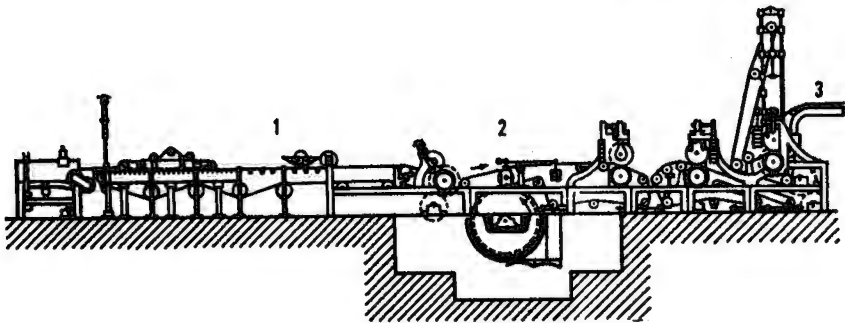
این فراورده‌ها و تصرفات مکانیکی یا شیمیایی مواد گوناگون، مورد آزمایشهای میکروسکوپی و آنالیزهای شیمیایی قرار گرفتند و در پی این کارها، اجزای متشکله گیاهان، از جمله سلولوز، شناخته شدند. آشنایی با طبیعت شیمیایی سلولوز مدیون چندین شیمیدان سده نوزدهم است که اصولاً از نظریه پردازان بزرگ آن زمان نبودند: پراوت، شلایدن، براکونو، پلین، هوفمان<sup>۲</sup>، بشان<sup>۳</sup>، شوایترز<sup>۴</sup>... اما کارهایشان سبب شد که ترکیب فراورده‌های دارای منشأ گیاهی یا حیوانی، که مدت‌ها صنعتگران آنها را به کار می‌بردند یا به عنوان غذا به کار می‌رفتند، دقیقاً روشن شوند. باز بدین ترتیب بود که فرمول خام سلولوز معین شد و معلوم شد که این ماده، در شکل نشاسته و آمیدون در پایان به گلوکوز می‌انجامد. با تعیین فرمول خام  $C_6H_{10}O_5$ ، که نویسندگان گوناگون ضرایب مختلفی برای آن نوشته‌اند، سلولوز در گروه هیدراتهای کربن جای می‌گیرد و خواص شیمیایی آن در سالهای ۱۸۵۰ - ۱۸۶۰ بخوبی شناخته شد. ساختار مولکولی آن بعدها در سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ با روشهای فیزیکوشیمیایی مشخص گردید.

کاغذ رول: نیازهای روزافزون به کاغذ در ربع دوم سده نوزدهم ایجاب می‌کرد که کمبود خمیر کهنه پاره با خمیر سلولوزی که از گیاهان به دست می‌آید جبران شود - کاری که هنوز در اروپا رواج دارد. این نوآوری نه تنها در پرتو پیشرفت شیمی، بلکه بدلیل وسایل مکانیکی که برای تهیه خمیر کهنه پاره اصلاح شده بودند، به دست آمد.

دستگاههای ساخت کاغذ رول که مبانی آنها در مجلد پیشین شرح داده شد (صفحه ۸۰۲)

۱. agave: گیاهی از تیره نرگیان با برگهای ضخیم نيزه‌ای که از الیاف آن در بافتندگی استفاده می‌شود. - م.

۲. Hofmann, اوگوست ویلهلم فون (۱۸۱۸-۱۸۹۲): شیمیدان آلمانی. - م.

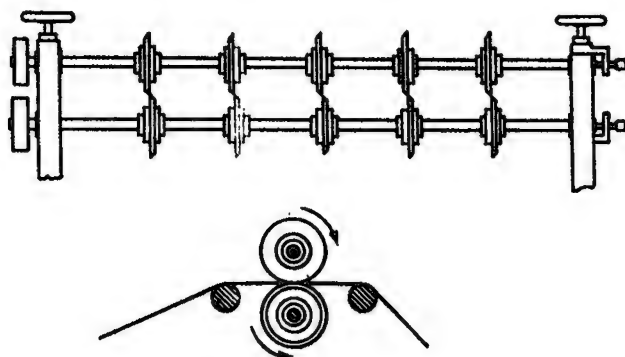


شکل ۳۶. دستگاه دو میزی کاغذسازی.

دستگاه دو میزی: سمت چپ، یک میز افقی، خمیر کاغذ در دیگی (۱) قرار دارد روی میز به سوی چپ پهن می شود و از پایین به سمت راست برمی گردد. میز دوم در قسمت ۲، استوانه ای است که دیگ خمیر کاغذ در آن قرار دارد. این خمیر با نخستین فشار آوردن به قسمت پایین، از خلال جدار استوانه، روی نمذ جاری می شود. خمیر وارد فضاهای متعدد استوانه می شود. هر دو برگ پیوسته، دقیقاً بالای دیگ استوانه ای به هم اتصال می یابند و با گذشتن از یک ردیف دستگاه پرس، که آنها را با هم می چسباند به سوی راست کشیده می شوند. کاغذ در قسمت ۳ بیرون می آید. ماشین دیگری که آن هم بزرگ و از ردیفهایی از استوانه خشک کننده تشکیل شده بود، جانشین دستگاه دو میزی شد. شکل بالا را با شکل ۴۴ صفحه مجلد سوم مقایسه کنید تا از پیشرفت وسایل مکانیکی صنعت شیمی، در برهه نیم سده، تصویری داشته باشید.

حدود سال ۱۸۲۰ به طور کلی مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاهها برای اینکه عملیات چسبزی و خشکانیدن نهایی به طور مکانیکی در زمان بیرون آمدن از دستگاه غلتک زنی و خشک کردن خمیر انجام گیرد بیدرنگ تکمیل شدند. برای ساختن انواعی از کاغذها، عمل چسبزی و افزایش مواد گوناگون برطبق عادت در خود خمیر انجام می گرفت؛ خمیر پیش از اینکه از خود دستگاه کاغذ سازی (شکل ۳۶) بگذرد به طور مکانیکی مخلوط می شد.

ساخت کاغذ رول، تنها زمانی توانست توجه واقعی را به خود جلب کند که عملیات اتمام، مکانیکی شد. این عملیات قبلاً با دست انجام می گرفت. مکانیسین های انگلیسی در انتهای دستگاه کاغذ نیم تمام، یک دیگ صمغ زنی با حرکت پیوسته و یک باتری متشکل از ۴۹ بشکه خشک کننده گذاشته بودند. این واحد ساخت، مجموعه مکانیکی جالب توجهی را تشکیل می داد. با پیشرفتهایی که در کار تراش دنده ها حاصل شد، امکان رسیدن به چنین نتایجی فراهم آمد. در واقع گردش چرخها و غلتکها، که خمیر بین آنها پنهان بود، سپس کاغذ نیم تمام در جریان خشک



شکل ۳۷. قیچی دیسکی کاغذ، ویژه دستگاههای ساخت کاغذ رول.

شدن، و بالاخره کاغذ موجود در دستگاه صمغزنی و سرانجام کاغذ صمغزده شده باید با سرعت مناسبی دقیقاً تنظیم شوند تا اینکه برگ کاغذ با هیچ‌گونه کششی، که ممکن است آن را در بخشی از تولید پاره کند مواجه نشود.

باز هم باید گفت که این تجهیزات جالب با ماشینهای قیچی تکمیل شدند. این ماشینها به‌طور مکانیکی رول کاغذ را در عرضهای مناسب برای قطع مورد نظر در جریان تولید می‌چیدند (شکل ۳۷). این قیچیه‌ها، زوجهایی از دیسکهای تیز، نصب شده بر روی محورهای موازی یکدیگر بودند. و برگ کاغذ در پایان مسیر تولیدی خود از میان آنها می‌گذشت.

ساخت کاغذ بدون وقفه بود. تنها به مراقبتی درحداً امکان زنان و کودکان نیاز داشت. زمانی‌که کار شب کودکان ممنوع اعلام شد، قیچیه‌ها از زنجیره تولید جدا شدند و برگها روی یک رول جمع می‌شدند؛ آن‌گاه همه تولید ۲۴ ساعته دستگاه، در ده ساعت کار قیچی می‌شد.

انواع دیگری از ماشینهای کاغذسازی در انگلستان اختراع شدند. دستگاههایی که میز مسطح برای نخستین مرحله بی‌آب کردن (چکه‌کشی) خمیر بود جای خود را به یک میز استوانه‌ای با توزیع‌کننده خودکار خمیر در بازوی کارتر محیط بر استوانه داد. دستگاههای دو میزی که تولید کاغذ ضخیمتر را با پرس کردن یک برگ روی دیگری، ممکن می‌ساخت موازی با آن کار می‌کرد.

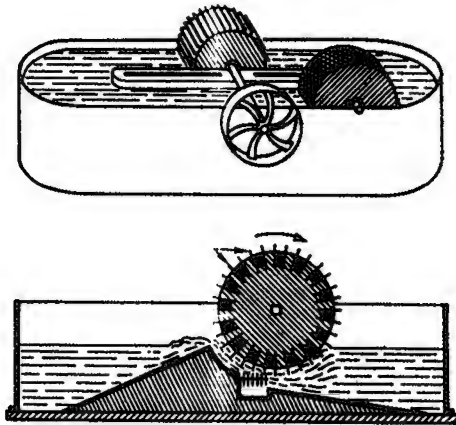
دستگاههای متعدد اتمام کار نیز در کارخانه‌های کاغذسازی، در همان زمان، بین سالهای ۱۸۵۰ - ۱۸۶۰ از جمله دستگاههای: مهره‌کشی، گلاسه کردن، ابریشم‌نما کردن، پارشمن‌نما کردن، ته نقش انداز و غیره - فعال بودند.



خمیر کهنه پاره و خمیر سلولوز: مکانیکی کردن کامل تغییر شکل خمیر کاغذ به کاغذ نیاز روزافزون و مداومی به مواد خام دارد و در مرحله پیش از ساخت، انگیزه تغییر شکل بنیادی روشهای ساخت خمیر بود. تنها مراجعه به منابع دیگر مواد خام کافی نیست و برای پرهیز از پیدایش یک تنگنای دیگر، باید برای متناسب کردن آهنگ تولید خمیر با سرعت مصرف آن بوسیله ماشین کاغذسازی چاره اندیشی کرد.

چنین می نماید که میل به سنت مدتها در ساخت خمیر کاغذ فرمان می رانده است. بویژه کار ژنده کردن پارچه ها با دست، لجوجانه بروش مکانیکی آن برتری داده می شد. درحالی که در سالهای ۱۸۶۰ - ۱۸۷۰ کارخانه هایی از قیچیهای مکانیکی استفاده می کردند و برای حذف دگمه ها، قلاپها و دیگر اشیاء سخت، موافق جدا کردن جمعی آنها بودند که پس از رقیق کردن زیاد و ظرف به ظرف کردن انجام می شد، شماری از کاغذسازان کار ژنده کردن پارچه را محتاطانه با دست انجام می دادند. با این همه، در عملیات دیگر که برای گذشتن از خیسانیدن تا مرحله تهیه نیمه خمیر، و بعد، مرحله خمیر، آن همه متعدد بود در طول دو یا سه دهه از نوعی مکانیزاسیون بسیار پیشرفته استفاده می کردند. در مرحله خیسانیدن، به جای لگن، از تجهیزات استوانه ای یا کروی گردان استفاده شد. وان ژنده سازی پارچه، بسیار آسان تکمیل شد، همچنانکه وان رنگبری هیچ گونه تغییر شکل اساسی را متحمل نشد (شکل ۳۸). برای چکه کشی، کاربرد تدریجی پرسهای مکانیکی و دستگاههای نمگیر آغاز شد. نیمه خمیرها در گاز کلر یا در کرور کلسیم بیرنگ شدند. شست و شو و پاکسازی که در مرحله نیمه خمیر انجام می گرفتند، در همان راستا، با وسایلی که دیگر می توان آنها را پیشرفته نامید عملی شدند. بدین ترتیب، جز در کار اولیه ژنده سازی پارچه، که در مورد آن کار دستی، ظاهراً یک شرط اساسی برای ساختن کاغذ خوب بود، تولید کاغذ از تکه های پارچه به درجه ای از مکانیزاسیون دست یافت که امکان عمل آوردن مقدار هنگفتی مواد جانشینی در همان ایامی که ناگزیر از استفاده از مواد دیگری بودند، فراهم آمد.

نخستین مواد جانشینی کهنه پاره که در سال ۱۸۵۰ به کار گرفته شدند حلفا، کنف، حصیر، و کاه بودند؛ اما تنها کاه، منبع نسبتاً غنی سلولوز بود. عملیات مقدماتی که بعضی از آنها با دست انجام می گرفتند، نیازی به وسایل خاص نداشتند، در آن زمان با دستگاه کاه خردکن و دستگاه الک آشنا بودند. دستگاههای خیس کننده ثابت یا گردان که با بخار آب گرم می شدند، به آسانی مورد استفاده قرار می گرفتند. شست و شو کننده گردان، که دارای یک ردیف الکهای مخروطی بود که در بالای دیگ شست و شو، به طور افقی می گردیدند، با چند دستکاری از استوانه های سرندکاری که در



شکل ۳۸. وان ژنده‌سازی و پاکسازی پیوسته خمیر کاغذسازی. دیگ با طول دو متر. استوانه با تیغه‌های برنده‌ای که در برابر یک صفحه ثابت با تیغه‌های برنده می‌گردد. در شکل بالا، در سمت راست، بشکه پاکسازی آب را خالی و خمیر را نگاه می‌دارد.

صنایع دیگر کاربرد داشتند، اقتباس شده بود. عملیات با دستگاه نمگیر پایان می‌گرفت. ماشین پاکسازی خمیر تفاوتی با آسیاهای غله، جز در مورد اندازه هر دو ماسه‌سنگ نداشت. سرانجام برای پاکسازی از وانهای معمولی استفاده شد. همه این روشهای تغییر شکل کاه به خمیر کاغذ، از اختراعی گرفته شده بود که در سال ۱۸۵۴ آقای ملیه<sup>۱</sup> به ثبت رسانیده بود، درحالی‌که آزمایشها از سی یا چهل سال پیش، کم‌وبیش گاه‌گاهی انجام می‌شدند، تصرفات شیمیایی تفاوتی از عمل آوردن کهنه پارچه نداشتند: شست‌وشو در سود، بیرنگ کردن کلرور کلسیم.

حدود سال ۱۸۹۰ عملیات بیرنگ کردن در دیگی که در آن با روش الکترولیز، کلرور سدیم و گاز کلر تولید می‌شد، آغاز گردید. بدین ترتیب در محلول، هیپوکلریت تشکیل می‌شود. انواع گوناگونی از وسایل برای بیرنگ‌سازی ساخته شدند که در اساس، یک ظرف الکترولیز با خانه‌های جنب یکدیگر بود که در یک وان بیرنگ‌سازی، که برای تأمین گردش مایع، آن را دستکاری کرده بودند، گذاشته می‌شد. این روش طبعاً با خمیر کهنه‌پاره‌ها جور بود و منطقاً از همان زمان پیدایش برای بیرنگ‌سازی خمیر چوب به‌کار گرفته می‌شد.

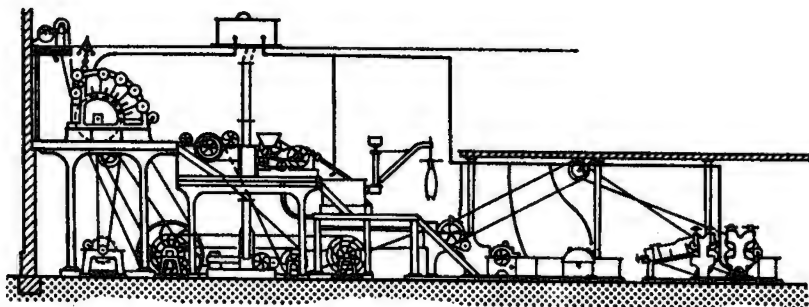
چوب: کاه جای خود را به سلولوز چوب وا گذاشت، این جانشینی لااقل پس از پنجاه سال عملی شد. چوب از آغاز سده نوزدهم به یک ماده صنعتی تبدیل شده بود که متحمل عملیات گوناگون

می‌شد. ساخت سنتی زغال چوب در کوره‌های سرباز، رفته‌رفته جای خود را به تقطیر در ظرف سر بسته داد تا فراورده‌های گوناگون تصعیدی که صنایع مختلف به‌طور روزافزونی خواهان آنها می‌شدند - الکل متیلیک، اسید استیک، استون و قطران گردآوری شوند.

از سوی دیگر، پوست چوب بریده شده را می‌سوزانیدند تا سخت‌تر و ناپوسیدنی گردد. از یک شعله گاز روشنایی یا سوخت روغنهای سنگین تقطیر زغال‌سنگ برای این کار استفاده می‌شد. این کار در کارخانه‌های کشتی‌سازی رواج داشت تا چوبهای مخصوص کشتی و نیز چوبهای ویژه کارگاههای تراورس‌سازی راه‌آهن (که قبلاً آنها را با سولفات مس آغشته می‌کردند)، تیرهای تلگراف و بالاخره وسایل کشاورزی را، فسادناپذیر سازند. حدود سال ۱۸۶۰ بود که حتی از خاک اره به هم چسبیده برای قالبگیری یا ساخت اشیاء تراشکاری‌شونده استفاده کردند.

این گسترش روشهای عمل‌آوردن شیمیایی چوب نمی‌توانست انگیزه راههای دیگر کاربرد نباشد. در سال ۱۸۴۰ آقای کله، که یک بافنده ساکسونی بود، روشی را برای رشته‌رشته کردن ماشینی چوب با دستگاه اره در جریانی از آب به‌ثبت برساند. با این حال، تجهیزات کامل برای استفاده صنعتی این روش، تنها بیست سال بعد بوسیله سازنده‌ای به‌نام ولتر<sup>۱</sup> عملی شد (شکل ۳۹). این دستگاه برای این طرح شده بود که ماده مورد عمل پیاپی همه عملیات را برای عبور پیوسته از یک دستگاه، به دستگاه دیگر، از مرحله رشته‌رشته کردن تا پرس خمیر به‌هنگام عبور از تمیزکننده، صاف‌کننده و یک باتری از بشکه‌های شوینده و سرندها تحمل کند. با این همه، نتایج کار در آغاز زیاد نویدبخش ارزیابی نشد. اتلاف چوب ۵۰٪، مصرف زیاد انرژی برای تهیه مقدار نسبتاً کم ۵۰۰ کیلوگرم در روز، و آرد چوبی که جز برای ساختن کاغذ نامرغوب که پس از مدت کوتاهی زرد می‌شود، مصرفی نداشت. اصلاحات پیاپی، از آن جمله، گذراندن از اتوکلاو، سبب ماندگاری این روش شد که خمیر خاص تهیه کاغذ روزنامه را در دوره‌ای که روزنامه‌ها با تیراژهای زیاد، در سایه ماشینهای لاینوتایپ (سطر ریز) و روتاتیو چاپ می‌شدند، تأمین می‌کرد. این خمیر مکانیکی نیز در مخلوط با خمیرهای کهنه‌پاره به‌کار گرفته می‌شد.

عمل‌آوردن شیمیایی چوب در دوره‌ای آغاز شد که رشته‌رشته کردن با دستگاه ایجاد شده بود. روشهای گوناگونی هم‌زمان به‌کار گرفته شدند: شست‌وشوی تحت فشار با سود، که مستقیماً از عمل‌آوردن کاه اقتباس شده بود، اما، میزان فشار و نسبت سود آن را بالا برده بودند؛ شست‌وشوی با اسیدهای معدنی (سولفوریک، کلریدریک یا تیزاب). روش اخیر نتایج بدی داشت و بیدرنگ کنار گذاشته شد. بعدها، در سالهای ۱۸۸۰، از اسید سولفورو، نخست به‌شکل سولفیت کلسیم



شکل ۳۹. دستگاه رشته‌رشته کردن چوب، ساخت ولتر.

سمت چپ و پایین، اره چوب‌بری و بالا بر. سمت راست اره، محور حرکت‌دهنده دستگاه با یک چرخ‌خاب، بعد، تلمبه‌ای که آب را به بام می‌رساند. در بالا و از چپ به راست و به طرف پایین: دستگاه رشته‌رشته‌ساز چوب، تمیزکننده اول، تصفیه‌کننده (دیگ گرد در مرکز، که پهلوی آن جراثقال دستی برای حرکت دادن دستگاه اره است). به طرف راست، دستگاه تقسیم‌کننده خمیر به نسبت ریزی آنها، گروه بشکه‌های فشاردهنده و در انتهای خط، صافی فشاری.

استفاده شد. ابتکارهای فردی و نیز روشهایی که بدون هیچ‌گونه نوآوری مهمی، بسرعت به‌کار گرفته می‌شدند، فراوان بودند. خمیر شیمیایی که از چوب کاج، درخت غان و تبریزی که در بی‌سولفیت به‌دست می‌آمد سرانجام نتایج مشابهی با خمیر کهنه پاره به‌دست آورد. و علاوه بر کاربرد عمومی در کاغذسازی، منبعی از سلولوز مرغوب شد.

نیتروژندهی به سلولوز: در اواخر سده نوزدهم، همه شرایط لازم برای اینکه روشهای گوناگون استخراج سلولوز، مبانی صنعت مهمی را تشکیل دهند فراهم آمده بودند. نه تنها وسایل این کار ایجاد شده بود، بلکه بازار هم آماده بود. علاوه بر تقاضاهای روزافزون کاغذ و مقوا از هر نوع، کاربرد مشتقات نیتروژندار، برای تولید مواد انفجاری، الیاف مصنوعی مواد پلاستیک و فیلمهای عکاسی هم در کار بودند.

شیمیدان اهل بال، آقای شونباین در سال ۱۸۴۵ اعلام کرد که توانسته است با عمل آوردن پنبه تحت تأثیر مخلوطی از اسید نیتریک و اسید سولفوریک نوعی ماده منفجره بسازد که آن‌طور که آتسلم پاین نوشته است «در محافل دانشمندان و جهان سیاست غوغایی برپا کرد».

طبیعی است که کشف یک ماده منفجره جدید، با ساختی چنین آسان، توجه جهان سیاست را باید به خود جلب کند. با وجود کوششهایی که از یک سده پیش شروع شده بود و علی‌رغم

پیشرفتهای شیمی، تولید شوره همیشه محدود مانده بود. برداشت شوره طبیعی، هنوز تنها منبع نیترات پتاسیم بود که همه تولید مواد منفجره با کمک آن انجام می‌گرفت. تنها در سالهای ۱۸۶۰، زمانی که رگه‌های نیترات سدیم شیلی و کلرور پتاسیم ناحیه اشتاسفورت<sup>۱</sup> مورد بهره‌برداری قرار گرفت، تبدیل نمک سدیم به شوره را آغاز کردند. نخستین ساخت شوره با این روش در ناحیه پروس، در زمان جنگ کریمه (۱۸۵۴ - ۱۸۵۵) شروع شد تا جانشین شوره وارداتی از روسیه شود. اما این روش، دشوار بود و جهان سیاست دلبستگی خود را به تولید فراورده‌های نیتروژندار حفظ کرده بود. درباره دانشمندان می‌توان گفت که شمار فراوانی از آنها از ۱۵ سال پیش، در ۱۸۴۵، به راهنمایی استنباطها و با کمک وسایل موجود در آن زمان، در کار آزمایش تأثیر همه عوامل شیمیایی موجود روی همه فراورده‌های طبیعی که با آنها برخورد می‌کردند، بویژه تأثیر اسید نیتریک روی چوب، کاغذ و پارچه‌ها بودند. بعضی از آنان، مثلاً آقای براکونو، شیمیدان اهل نانسو فراورده‌های نیتروژنداری، گزیلوئیدین، کاغذهای ازتی، تهیه کرد که ترکیب و خواص آن مورد بررسی برخی از همکاران وی، از جمله آقایان: پلوز<sup>۲</sup> و یوانسو<sup>۳</sup>، و پین قرار گرفت. نیتروسولوز ساخته شوناین در محیطی کاملاً آماده برای افزایش دنباله‌هایی بدان فرو افتاد. در واقع شیمیدانها بی‌درنگ به همانندی ساختار شیمیایی پنبه باروتی با کاغذ ازتی پی‌بردند.

پنبه باروتی: شیمیدان اهل بال و همکار وی آقای بوته<sup>۴</sup> با به‌کار گرفتن مخلوط سولفو نیتریک، روشی کارآمدتر از تأثیر تنهای اسید نیتریک را پیشنهاد کردند. شیمیدانهای متعددی این روش تهیه را با کوشش برای تغییر شرایط آن دنبال کردند. فراورده‌های بسیار گوناگونی بی‌درنگ به بازار روانه شدند و با نامهای مختلفی پیروکسام<sup>۵</sup>، پیروکسیل<sup>۶</sup>، پیروکسیلین<sup>۷</sup>، و فولمی-کوتون<sup>۸</sup> شناخته شدند. فراورده نخست، یک مشتق نیتروژندار نشاسته بود و فراورده‌های بعدی از مشتقات سلولوز. سرانجام نام پنبه باروتی در فرانسه غالب آمد و در انگلستان آن را *guncotton* نامیدند. در مورد نیتروسولوز باید گفت که بسیار دیر به‌کار گرفته شد و در اواخر سده نوزدهم از سلولوز به‌دست آمده از چوب به کمک بی‌سولفیت برای تهیه آن استفاده می‌شد.

طی چند دهه پس از کارهای شوناین، این ترکیب نیتروژندار، صرفاً از پنبه بود زیرا می‌دانستند که رشته‌های کوتاه (کرک)، سلولوزهای تقریباً خالص هستند. بحثها درباره ترکیب مشتقات گوناگون

۱. Stassfurt: ناحیه‌ای در مشرق آلمان، که دارای معادن پتاس و نمک است.-م.

۲. Pelouze: توفیل ژول ۱۸۰۷-۱۸۶۷، شیمیدان فرانسوی و همکار گی‌لوساک.-م.

۳. Poinso: لویی ۱۷۷۷-۱۸۵۹ ریاضیدان فرانسوی.-م.

4. Boetger 5. Pyroxam 6. Pyroxyle 7. Pyroxyline 8. Fulmi-coton

نیتروژندار، طولانی و بسیار مبهم بودند. سرانجام، نوعی زبان مشترک برای کارشناسان، با در نظر گرفتن مقدار نیتروژن تثبیت شده و حلالیت آن در مخلوطی از الکل و اترسولفوریک تصویب شد. شیمیدانها بخوبی فهمیدند که این فراورده‌های گوناگون در واقع آمیزه‌ای از مشتقات نیتروژندار هستند که شناسایی آن تا زمانی که ساختار سلولوز ناشناس مانده باشد دشوار است.

به دنبال نخستین مسرتها، نوعی احتیاط ترس آور پدید آمد که علت آن چند انفجار کارگاه بود. در سال ۱۸۶۵ آقای ف. ا. ایبل<sup>۱</sup> شیمیدان انگلیسی راهی یافت که بر اثر آن ترکش آسان نیتروسولولوزها کاهش می‌یافت. آقای ایبل نیتروسولولوز را در پایان ساخت از وان خمیر کاغذ می‌گذرانید تا این ماده نیتروژندار به خمیر تغییر شکل دهد، آن‌گاه این خمیر را در (پرس هیدرولیک) تحت فشار قرار می‌داد. با این حال، انفجارها، بویژه در مرحله خشکاندن، ادامه داشتند. پس از مدت زیادی فهمیدند که جریان هوای گرم نوعی بار الکتروستاتیکی ایجاد می‌کند که می‌تواند با کمترین حالت تخلیه، مانند چاشنی عمل کند.

بنابراین، به‌کاربرد پنبه باروتی در ترکانیدن سنگهای معدن بسنده کردند. در زمان جنگ انفصال، به‌عنوان ماده انفجاری نظامی به آن دل بستند، اما در اسلحه گرم، به عنوان مین، و سپس برای مهمات اژدها آن را به‌کار بردند. در سال ۱۸۶۴ آقای ویسی مهندس باروتسازی فرانسوی، نخستین باروت بیدود را ساخت که آن را باروت B نامیدند. اما تنها ۲۰ یا ۲۵ سال بعد بود که باروتهای بالیستیکی با پایه نیتروسولولوز به‌طور کامل جانشین باروت سنتی سیاه شدند.

نیتروگلیسرین: این تحول در ساخت مواد منفجره، در گسترش واکنشهای نیتروژندار کردن مواد آلی دیگر، نخست گلیسرین و بعد هیدروکربنهای بنزنی مؤثر افتاد.

خطرهای نیتروگلیسرین را، تنها پس از ۲۰ سال، در همان دورانی که برای بی‌خطر کردن نیتروسولولوز می‌کوشیدند برطرف کنند. آقای آسکانیو سوپرو شیمیدان ایتالیایی که در پاریس در آزمایشگاه پلوزکار می‌کرد توانست نخستین گلیسرین نیتروژندار شده را در سال ۱۸۴۶ تهیه کند. چندی نگذشت که تکرار این روش، به ساخت فراورده دیگری انجامید که آن‌هم به‌نوبه خود نامهای متعددی یافت: روغن فولمینات، نیترولوم، تری‌نیترین، پیروگلیسرین، گلوئئین و... نیتروگلیسرین در آغاز در داروسازی به‌کار گرفته شد، گرچه به‌طور بسیار تصادفی. شیمیدانها نخست به بررسی ترکیب آن پرداختند، که شیمیدان انگلیسی به‌نام ویلیامسون آن را معین کرد؛ همچنین به تحقیق درباره خواص آن مشغول شدند. حساسیت نیتروگلیسرین به ضربه، در آغاز کاربرد آن را به‌عنوان یک ماده منفجره ممنوع کرد. پدر آقای آلفرد نوبل، مهندس پطرزبورگ نتوانست از آن در جنگ

۱. Abel, فردریک اوگوستوس (۱۸۲۷-۱۹۰۲): شیمیدان انگلیسی

کریمه به سود ارتش روسیه استفاده کند. خود آلفرد نوبل که در سال ۱۸۵۹ به سوئد بازگشت از مغز مبتکر خود برای به‌کار گرفتن این ماده منفجره جدید کمک گرفت. یکی از نخستین اختراعات به ثبت رسیده وی در سال ۱۸۶۴ مربوط به استفاده از نیتروگلیسرین به عنوان ماده منفجره است. وی از این سال ساخت و فروش آن را شروع کرد. انفجارهای متعدد قربانیانی در کارگاهها و مخازن برجای گذاشت که برادر خود آلفرد نوبل در ۱۸۶۴ از جمله آنان بود. با وجود احتیاطهای فراوان این معاصران، مخترع سوئدی کارهای خود را دنبال کرد و در ۱۸۶۶ با قابل جذب گردانیدن این فراورده غلیظ روغنی بوسیله نگهدارهای سیلیسی و متخلخل از خاک رس خشک و گرد شده یا کیزلگور توانست نیتروگلیسرین را تثبیت کند. نیتروگلیسرین که کاربرد بسیار مطمئنی یافته و بدین ترتیب به دینامیت تبدیل شده بود، با موفقیت سومی روبه‌رو شد. نوبل در پوشش امتیازهای خود، شعبات و کارخانه‌هایی در همه کشورهای صنعتی تأسیس کرد. این زمانی بود که شبکه‌های راه‌آهن در مناطق کوهستانی اروپا و امریکای شمالی تشکیل می‌شد؛ کاری که بسیار زمانگیر و پرهزینه بود و چنانچه مقاطعه‌کار چاشنیهای دینامیت در اختیار نداشت بعضی از قسمتهای آن احتمالاً ساخته نمی‌شد. تولید صنعتی نیتروگلیسرین در تبلیغ نیتروسولوز مؤثر افتاد. در سالهای پس از اختراع دینامیت، نوبل که نیتروسولوز را هم ساخته بود آمیزه‌های گوناگونی از هر دو فراورده را آزمایش کرد و در ۱۸۷۵ به ساخت یک ردیف تمام مواد منفجره ژلاتینی توفیق یافت - موادی که می‌شد آنها را با اطمینان در سلاحهای گرم و نیز در مینها و کارهای عمومی به‌کار برد.

شیمی مواد منفجره: طی دو دهه پایانی سده نوزدهم، برای تولید مواد منفجره جدید، بررسیها، دامنه وسیعی گرفت. اختراع چاشنی فولمینات به توسط نوبل در ۱۸۶۷ و نیز اختراع قدیمتر فتیله انفجار که طناب بیکفورد نامیده می‌شد و می‌توانست آتش را در کمال امنیت از فاصله انتقال دهد کار با مواد انفجاری را بی‌خطر کردند. پیدایش چاشنی برقی با قرقره القا، آتش کردن فوری دینامیت را ممکن ساخت.

شیمی مواد انفجاری رشته تازه‌ای شد و در سالهای ۱۸۹۰ پیشرفت سریعی کرد. روش نیتروژندهی با آمیزه سولفونیترونیک، به‌طور سیستماتیک روی ترکیبات آلی بسیار گوناگون، نشاسته، قند، و ملاس انجام می‌گرفت، اما بویژه روی ترکیباتی عملی می‌شد که یک هسته بنزنی داشتند: بنزن، تولوئن، نفتالین و مشتقات آنها، آمینها و فنولها. بدین ترتیب، دیده می‌شود که طی چند سال انبوهی از فراورده‌های نیتروژندار، به‌طور کلی سه نیتروژنی ساخته شدند که سازندگان آنها برای تصویب کمیسیونهای دولتی مسؤول در هر کشور که بر کار تولید مواد منفجره مراقبت و فعالیت داشتند

می‌کوشیدند. از میان نسل مواد منفجره این دوران، ترکیب تری‌نیتروفنول از مدتها پیش با نام اسید پیکریک شهرت داشت، که جملگی یا بخشی از آن در تهیه ترکیب لیدیت<sup>۱</sup> در انگلستان مصرف می‌شد، این ترکیب در فرانسه به ملینیت<sup>۲</sup> شهرت داشت. توجه به تری‌نیتروتولون از سال ۱۸۹۴ بسیار زیاد شد. در جریان جنگ جهانی اول و نیز در جنگ جهانی دوم با وجود پیشرفتهای انجام شده در رشته شیمی مواد منفجره بین این دو جنگ، از اعتبار آن کاسته نشد.

کارشناسان در اواخر این سده در هنر اتصال دادن فراورده‌های بنیادی برای تهیه باروتهای بیدود و مواد انفجاری بدون خطر، استاد شده بودند. باروتهای بیدود ویژه اسلحه گرم بودند. آنها را یا با نیتروسولولوز خالص، مانند باروت B که در فرانسه ساخته می‌شد، یا با آمیزه‌ای از نیتروگلیرین و نیتروسولولوز، مانند ترکیب بالیستیت<sup>۳</sup> نوبل یا کوردیت<sup>۴</sup> انگلیس و بالاخره یا با آمیزه نیتروسولولوز و نیتروبنزن، مانند باروت *Du pont* امریکاییها می‌ساختند.

مواد انفجاری بدون خطر از حدود سال ۱۸۹۰ برای به‌کارگرفتن در معادن زغال‌سنگ مورد بررسی بودند. کمیسیونهای دولتی مأمور به‌اجرا درآوردن کارهایی شدند که امکان ساخت مواد منفجره‌ای را فراهم کند که به‌هنگام ترکش، کمترین گرما را ایجاد کنند تا از ضربه‌های آتشده (گریزو) و نیز ضربه‌های گرد و غبار پرهیز شود. ترکیب پایه‌ای مورد قبول، نیترات آمونیم بود. در آن هنگام به تهیه آمیزه‌های گوناگونی از این جسم با ترکیبات مختلف، مواد چرب، صابون، پرمنگنات، نفتالین دست زدند. مشتقات نیتروژندار ردیف آروماتیک، در پایان کار به‌عنوان مواد کمکی زیاد به‌کارگرفته شدند. گرد Favier (۱۸۸۹ - ۱۸۹۰) در فرانسه بیش از بقیه به‌کار می‌رفت که مخلوطی از حدود ۹۰٪ نیترات آمونیم و مونو، بی، یا تری‌نیترونفتالین بود.

در مدتی حدود سی سال ۱۸۷۵ - ۱۹۰۵، رشته مواد منفجره گسترش چشمگیری داشت. نه تنها شیمی نیتروژندهی که آقایان شونباین و سوپرو، با فراهم کردن مبانی تکنیکی آن را پایه‌گذاری کرده بودند بلکه خود زمانه با دست‌ودلبازی، ردیف تقریباً بی‌پایانی از فرصتهای مساعد برای تجربه کردن فراهم آورده بود. کارهای بزرگ دولتی محققاً رو به پیشرفت داشت، اما جنگ هم بی‌تأثیر نبود. از زمان جنگ کریمه تا آغاز جنگ جهانی اول عملاً یک یا چند جنگ، چه در اروپا، چه امریکای شمالی و جنوبی یا مرکزی و چه در آسیا پیوسته شعله‌ور بوده است. آن زمان که دولتهای بزرگ در جنگ با یکدیگر بودند، از این مواد تجربه‌اندوزی می‌کردند؛ و زمانی که جنگ در بالکان یا امریکای جنوبی شعله می‌کشید آنها از به آزمایش گذاردن سلاحهای جدید خود بوسیله این یا آن طرف - گاهی هم هر دو طرف جنگ - غفلت نمی‌کردند. مؤسسات بزرگ متالورژی هم همین



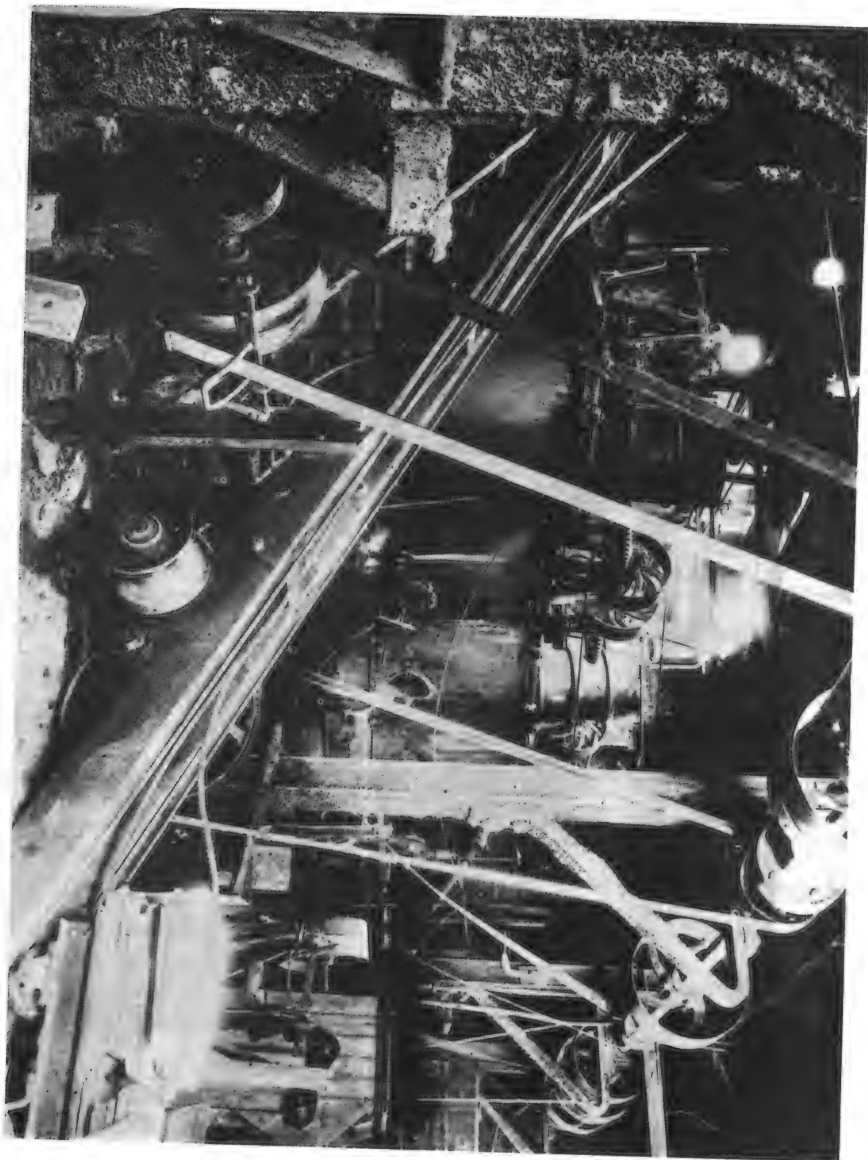
وسایل جنگی را تولید می کردند.

مبانی استقرار یافته از دهه های نخستین سده بیستم در پی این دوران طلایی، تا زمان جنگ جهانی دوم، تغییر شکل بنیادین نداشتند. اکسیژن مایع (رجوع کنید به صفحه ۷۳۲) پس از کاربرد نخستین آن برای سوراخ کردن تونل زیملون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۰۰، کاربرد چشمگیری نداشت. به کارگیری زیاد مواد منفجره با پایه مشتقات نیتروژندار ترکیبات ردیف آروماتیک در زمان جنگ جهانی اول، هر دو طرف جنگ را بر آن داشت که واحدهای تولیدی اسید نیتریک، تولوئن، فنول و غیره را بر پایه های صنعتی جدید به کار اندازند. گرچه این تلاشها، پیش از ۱۹۱۸ در هیچ کشوری دستاوردی نداشت، دنباله آن به شکوفایی صنایع بزرگی انجامید که تا آن زمان پیشرفت زیادی نداشتند یا از روشهای سنتی استفاده می کردند که بزودی کنار گذاشته شدند.

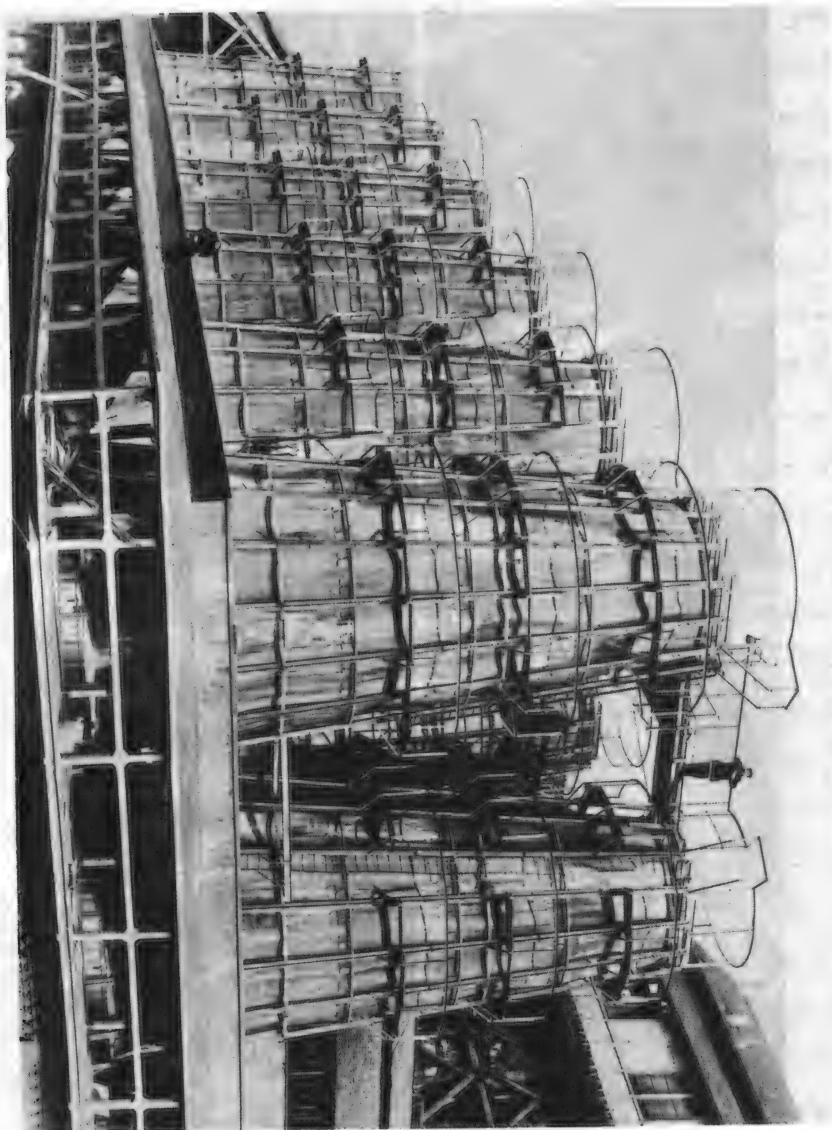
فراورده های شیمیایی با کاربرد جنگی: از همان آغاز جنگ جهانی دوم، یک ضرورت ناشناخته به دو طرف جنگ، بویژه انگلستان و ممالک متحده آمریکا تحمیل شد: اقتصاد هیدروکربنهای لازم برای حرکت خودروهای موتوری. شیمیدانها به سوی مواد خام بسیار ساده و فراوان، یعنی: آب، هوا و زغال روی آوردند. انگلیسیان برای تهیه دو ماده منفجره قوی از طریق سنتز الکتروشیمیایی راهی یافتند: سیکلونیت، که در مدت جنگ بوسیله نیروی دریایی ممالک متحده با نام RDX (هگزاهیدرو، ۳، ۵، تری نیتروتری آزن) به کار گرفته شد و PETN (ترانیترات پنتا اریتریتول). ترکیب RDX از همه مواد منفجره نسل خود قویتر بود و به شکل مخلوط با تری نیتروفنول و گرد آلومینیم برای خرج مینها و اژدرها به کار گرفته شد.

فراورده های گوناگون فراوانی در صنایع شیمیایی نظامی در هر دو جنگ در کشورهای مربوطه ساخته شدند. در اینجا از گازهای جنگی که برای ساخت آنها، تولید الکترولیزی کلر در فرانسه گسترش فراوان داشت و ترکیبات آن حیرت انگیز بود ذکر می کنیم. فراورده های دودکننده در جنگ جهانی اول ساخته شدند و پیش از جنگ جهانی دوم و نیز در طی آن تکثیر یافتند. مواد آتشزا نیز یک خانواده بسیار متنوع است. گرد آلومینیم در سال ۱۹۰۰ وارد ترکیب گردهای بیخطر شد. در طی سالهای ۱۹۳۰ فرمولهای گوناگونی از مخلوطهای گرد آلومینیم و منیزیم به کار گرفته شدند. یکی از آخرین پیشرفتهای در این راه، بمبهای آتشزای ساخته شده از آلومینیم و اکسید آهن، و بمبهای منیزیمی بودند که آمریکاییها از سال ۱۹۴۲ از آنها استفاده کردند. سرانجام برای آتشزایی، بمبهای بسیار سبک ساخت ژاپن از همه مؤثرتر بودند. آمریکاییها نوعی بنزین ژله ای ساختند که با

۱. Simphon: گذرگاهی در آلهای سویس که پیمون را به والو متصل می کند. -م.



تابلوی ۳۱. کارخانه آئین سازی سن دنی از شرکت کولمن (۱۹۱۶).



تابلوی ۲۲: کارخانه ساخت اسید سولفوریک بوش اطالهای سری (حدود ۱۹۶۰).

ادغام یک صابون فلزی<sup>۱</sup>، با نام بمب ناپالم<sup>۲</sup> در زمان جنگ ویتنام بسیار به کار می بردند و بمباران مرکز توکیو با آن در ژانویه ۱۹۴۵ بیش از ۲۰ کیلومتر مربع را ویران ساخت.

کلودیون: زنجیر طولانی اختراعات مواد منفجره جدیدی به یاری روشهای نیتروژندار کردن ترکیبات آلی استخراجی از مواد طبیعی و بویژه از سلولوز ساخته شد. آقای گودن<sup>۳</sup> شیمیدان متوجه شد که بعضی از نیتروسولوزها دارای این خاصیت جالب هستند که در آمیزه ای از الکل - اتر حل می شوند و نوعی محلول شربتی می دهند. این محلول را آقای مینزد<sup>۴</sup> امریکایی کلودیون نامید و پس از مدت کوتاهی کاربرد آن در پزشکی و جراحی معلوم شد. این محلول بسیار تبخیرشونده، می تواند بزودی روی زخم لایه نازکی از نیتروسولوز بسیار چسبنده تشکیل دهد. بعدها در سالهای ۱۸۵۰ امکان پدید آمدن آسان لایه نازک، بازارهای دیگری برای آن به وجود آورد.

از مهم ترین آنها تهیه صفحات حساس برای فیلمهای عکاسی است که نویسندگان متعددی به طور مبهم به آن اشاره کرده بودند، اما در پایان ۱۸۵۱ آقای اسکات آرچر<sup>۵</sup> آن را دقیقاً شرح داد. سلولوئید: تغییر مسیری که کلودیون ایجاد کرد، تنها مرحله ای نسبتاً کوتاه از مراحل اولیه عمر عکاسی را تشکیل می دهد؛ مرحله ای که تا حدی اهمیت تاریخی دارد، زیرا انگیزه کاربردهای دیگر این فراورده شد - کاربردهایی که پایه گذار صنایع عظیم سده بیستم بودند. در سالهای ۱۸۶۵ - ۱۸۷۰ افکار تازه ای درباره استفاده از لزوجت (ویسکوزیته) و خاصیت سرعت خشک کردن کلودیون برای کاربرد آن به جای مواد دیگر، در ساخت گلهای مصنوعی و صحافی کتابها و تکثیر اشیاء زینتی قالبگیری شده، به میان آمد. محققى به نام آقای ج. و. هایت<sup>۶</sup> امریکایی کاربرد یک ترکیب مصنوعی به جای یک ماده طبیعی را بیشتر جلو برد و وسیله شکلپذیر کردن نیتروسولوز را با مخلوط کردن آن با کامفر و الکل، یافت. ماده اخیر تنها برای آسان کردن مخلوط شدن افزوده می شود، و کامفر به تنهایی نقش شکلپذیرکنندگی دارد. چنین فراورده ای در سال ۱۸۷۰ به نام سلولوئید روانه بازار شد. این فراورده بیدرنگ موفقیت فراوان یافت. مخترع آن، آن را جانشین عاج برای ساخت گویهای بیلیارد معرفی کرد. سلولوئید در واقع هم، شاخ، فلس، ابونیت، گوتاپرکا را در همه کارهای مهره و عروسک سازی قالبگیری شده، حذف کرد. این ماده که قالبگیری آن سهل و با کمی گرم کردن جوش می خورد و با ابزارهای سرد تراشیده می شد و به هنگام ساخت امکان رنگ کردن آن

۱. که از نمکهای سرب و آلومینیم و تعدادی فلز دیگر با اسیدهای چرب تهیه می شود و در رنگکاری و تهیه پارچه به کار می رود. - م.

۲. napalm از دو واژه naphtenic acids و palmitic acids ساخته شده است. - م.

وجود داشت، با وجود آتشگیر بودن، کاربردهای بسیار فراوان یافت. با وجود پیدایش مواد پلاستیکی دیگر، گالالیت<sup>۱</sup> در ۱۸۹۷، با کلیت در ۱۹۰۷، پلوپا<sup>۲</sup> در ۱۹۱۸ و غیره، کاربرد سلولوئید با مکت بسیار زیاد و تنها در سالهای ۱۹۲۰ به کناری گذاشته شد. فرمولهای ساخت آن متعدد بودند. سلولوئید نمایندگی نوعی از مواد مصنوعی را دارد که شیمی صنعتی هنوز هم غالباً، لااقل تا میانه سده بیستم، بدون اطلاع کافی از چگونگی واکنشهایی که در دیگها و همزنهایش انجام می گیرند، آنها را تولید می کند.

ابریشم مصنوعی: ردیف دیگری از فراورده های سلولوزی با نخستین کارهای ایلر-ل. شاردونه<sup>۳</sup> به بازار آمد. وی برای تهیه ابریشم مصنوعی، کلودیون را با فشار از چرخ ابریشم کشی شیشه ای گذرانید و در انتهای آن، شکلی از یک رشته طویل و قابل پیچیدن دور قرقه، در آب به دست آورد. نتایج اولیه کار آقای شاردونه در ۱۸۸۷ شناخته شد اما می بایست مخترع سالهای زیادی به تلخکامی زیاد بگذراند تا به یک تولید صنعتی دست یابد. وی تنها با کارهای تجربی توانست توفیق یابد: افزایش مواد الحاقی به کلودیون، نمکهای فلزی، بازهای آلی برای بهتر کردن شرایط نخ سازی و خواص فیزیکی نخ، روش دلمه ای کردن در انتهای چرخ ابریشم کشی، عمل آوردن نخ برای حذف لااقل جزیی نیتروژن از ابریشم مصنوعی.

آقای شاردونه توانست به نخهای مصنوعی خود، تا حد رضایتبخشی، لطافت ابریشم را بدهد، اما عیب عمده این نخها، با وجود کوششهای انجام شده وی و سازندگان متعدد دیگر، استعداد این نخها به تجزیه تدریجی و آتشگیری آنها بود. شاردونه ضمن اقدامات خود، روشی را که ژوزف سوان برای ساخت رشته های کربنی ویژه لامپهای برقی اولیه (۱۸۷۸ - ۱۸۸۰) اتخاذ کرد، تکرار نمود. نخ نیتروسلولوز را با سولفور آمونیم عمل آورد تا با سلولوز پوشیده شود. آقای سوان نخ سلولوزی با ضخامت کاملاً دقیق را در معرض نوعی زغالی کردن تحت کنترل قرار داد تا تبدیل به افروزه شود. اما احیای قلبایی سلولوز، نوعی نخ بافندگی نامرغوب ایجاد می کرد. ناچار به روشهای کمتر کارآمد روی آوردند که آتشگیری نخ را مقدار کمتری کاهش می داد. به گفته آقای شرود تیلور، ابریشم مصنوعی را خود کارگران سازنده آن «ابریشم مادر زن» می نامند، و این به علت ملالی است که شخصی که لباسی از آن را هدیه گرفته است، احساس می کند.

در سالهای نخستین، اشکال دیگری در کار آمد که شاید هدف تبلیغی داشته است و آن، هزینه گزاف تولید بود. عالیتترین پنبه را برای اینکه ابریشم خوبی داشته باشند نیتروژنی می کردند. بهای مواد الحاقی، مالیات زیاد که به الکل بسته شده بود و عمل آوردن نهایی این فراورده، سنگین

بود. ابریشم مصنوعی را گرانتر از ابریشم طبیعی می‌فروختند. اما گویا این اشکال مانع فروش آن نمی‌شد. در سال ۱۸۹۵ دولت فرانسه جوایزی را برای پرورش‌دهندگان کرم ابریشم تعیین کرد تا زیان رقابت ابریشم مصنوعی جبران شود. این وضع، مردم را گمراه کرد. در آغاز سال ۱۸۹۹ تقاضا چنان بالا رفت که سازندگان از عهده تأمین آن برنیاوند. بهای بعضی اقلام مثلاً ملیله و یراق با ابریشم مصنوعی، به سه برابر نوع طبیعی آن رسید؛ اما بعداً وضع یکباره معکوس شد.

سلولوزهای قلیایی: درست است که این تولید منظم‌اً افزایش یافت، اما روشهای کم‌خطرتری با روشهای شاردونه رقیب شدند. مهمترین روشها در این زمان، تأثیر دادن محلولهای قلیایی روی سلولوز بود که نیم سده پیش از آن در ۱۸۴۴ آقای جان مرسر<sup>۱</sup> آن را به‌کار برده بود. محلول سود، به پنبه جلا می‌دهد و به استحکام آن می‌افزاید و قابلیت فوق‌العاده‌ای برای رنگ گرفتن در آن ایجاد می‌شود. مرسر بزه کردن تا اواخر این سده، رونقی نداشت. توما<sup>۲</sup> و پره و شیمیدانهای فرانسوی بودند که با یک ردیف اختراعاتی که در سالهای ۱۸۹۶ و ۱۸۹۸ در قسمت کرب کردن پارچه به ثبت رسانیدند، کاربرد آن را توسعه دادند.

پیش از آنان در سال ۱۸۹۲ آقایان چارلز کراس<sup>۳</sup> و ا. ج. بوان<sup>۴</sup> وسیله رشته کردن سلولوز قلیایی محلول در سولفورکربن را، با گذرانیدن این محصول از یک محلول رقیق اسید سولفوریک در انتهای چرخ ریسمان‌کشی شناسانیده بودند. هزینه تولید این فراورده در آغاز بسیار بالا بود زیرا از کرب و سولفورکربن که هنوز گران بود برای ساخت آن استفاده می‌شد. ده یا پانزده سال بعد که برای تهیه آن، سلولوز چوب و بی‌سولفیت را به‌کار بردند نخ و یسکوز رفته‌رفته جانشین ابریشم شاردونه شد. از میان روشهای دیگری که در این دوره به‌کار گرفته شدند، تنها یکی از آنها، آن‌هم به‌شکل بسیار بی‌سروصدا، ماندگار شد و آن روشی بود که آقای پاولی در سال ۱۸۹۵ پیشنهاد کرد. این روش، از خاصیت کاملاً شناخته شده‌ای از سلولوز در آن زمان استفاده می‌کرد و آن حل شدن در مایع کوپر و آمونیاکال شواتر بود. نخ و یسکوز به‌نگام خروج از چرخ از محلول اسید استیک گذرانیده، سپس کشیده و دور قرقره پیچیده می‌شد. مس و آمونیاک را به‌شکل استات بازیابی می‌کردند.

از مجموع انواع سلولوزهای عمل‌آورده یا بازیابی شده در سال ۱۹۰۰، ابریشم شاردونه ۸۰٪ تولید جهانی الیاف مصنوعی را تشکیل می‌داد و ۲۰٪ مانده از یسکوز و سلولوز کوپر و آمونیاکال بودند. بعدها در سالهای ۱۹۳۰ یسکوز به‌طور کامل جانشین ابریشم شاردونه شد. در سال ۱۹۳۸ تولید الیاف سلولوزی بین یسکوز (۸۲٪)، استاتها (۱۳٪) و بقیه، سلولوز کوپر و آمونیاکال تقسیم شد.

استاتهای سلولوز: ساخت استاتهای سلولوز بسیار دیر دارای اهمیت صنعتی شد. در واقع پس از کارهای شوتسبرگر در سال ۱۸۶۹ بود که توانستند سلولوز را به استات تبدیل کنند که محلول بود. در ۱۸۹۰ آقای دیویه<sup>۱</sup> بر پایه نیتروسلولوز این کار انجام داد و چهار سال بعد آقایان کراس و بان که نخستین آزمایشها را برای به‌کار بردن گزانتات سلولوز در ساخت ویسکوز انجام می‌دادند توانستند این استات را مستقیماً به‌دست آورند. محصول آنها به مدت ده سال فاقد خاصیت شکل‌پذیری بود- چیزی که نیتروسلولوز را ممتاز می‌ساخت. نخستین کارخانه برای عملی کردن روشهای آنان در سال ۱۹۰۲ در آلمان تأسیس شد و به‌علت مشکلات فنی موجود در راه آن و نیز نخستین رونق ساخت ویسکوز در ۱۹۰۶، بسیار آهسته پیش رفت. تولید صنعتی استاتها، نخست متضمن تأسیس کارخانه‌ای برای تولید اسید استیک یخی (گلاسیال)، یعنی اسید بی‌آب، و نیز استون بود که به‌عنوان حلال به‌کار می‌رفت. اسید استیک صنعتی را در آن زمان از تقطیر چوب به‌دست می‌آوردند. حدود سال ۱۹۱۰ تقطیر شراب خام چغندر نیز به‌کار گرفته شد. تنها در سالهای ۱۹۲۰ بود که تهیه صنعتی آن بروش سنتز بر پایه استیلن آغاز شد. خود استون را از تقطیر خشک استات کلسیم به‌دست می‌آوردند. بنابراین، گرچه سلولوز چوب بسیار فراوان شده بود، مواد اولیه دیگر، تا دوره بعدی، بسختی به‌دست می‌آمدند.

بدین‌ترتیب، استات سلولوز، تنها توانست برای تهیه فیلمها، استیل سلولوئید و ورنیها بازار مختصری پیدا کند. کمی پیش از جنگ جهانی اول، کاربرد نیتروسلولوز در فرانسه برای ساخت فیلمهای عکاسی ممنوع اعلام شد. اما این ممانعت، تنها پس از جنگ یعنی زمانی عملی شد که استاتهای سلولوز به مقادیر هنگفت و با بهای مناسبی وارد بازار شدند. در مدت جنگ، در واقع پژوهشهای فراوانی در همه کشورهای برای تهیه ورنیهای ناتراوا، اشتعال‌ناپذیر و فاسدناشدنی برای پوشاندن پارچه‌ها و بالهای هواپیما انجام گرفت. استاتهای سلولوز به این نیازها دقیقاً پاسخ می‌دادند. شیمیدانها در کنترل واکنش استیلدار کردن سلولوز بوسیله آلذئید استیک، که خود آن با واکنش دادن کلرور استیل (که از آلذئید به‌دست می‌آمد) بر استات سدیم تهیه می‌شد، با کمک کاتالیزوری از اسید سولفوریک مهارت یافتند. اسید استیک به‌عنوان رقیق‌کننده لازم بود. هنوز از محدوده نسبتاً تنگ منابع مواد خام خارج نشده بودند.

با این‌حال، در پاسخگویی به نیازهای جنگی، ساخت استاتهای سلولوز، طی دو سال آخرین جنگ بشدت افزوده شد. پس از پایان مخاصمات، تأسیسات صنعتی مهم، در این زمینه و نیز در زمینه‌های دیگر باقی ماندند. امکان استفاده از آنها در ساخت مواد پلاستیک و فیلمهای سلولوزی

وجود داشت. دنباله فرآورده‌ها، طی سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۳۰ به صنعتی کردن اسید استیک بر پایه استیلن کشیده شد. در زمینه مواد پلاستیکی، استیل - سلولوئیدها با نامهای متعدد تجارتي در همه کشورها به فروش رسیده‌اند. در فرانسه، رایجترین نام رودوئید *rhodoid* است. آنها همیشه بر کلوئیدهای دارای پایه نیتروسلولوزی، که دیگر بیش از ۲۵٪ تولید جهانی مواد پلاستیکی نیستند برتر شمرده شده‌اند - نسبتی که در سال ۱۹۱۳ برابر ۸۰٪ و در ۱۹۲۴ برابر ۵۰٪ بود. در این دوره مواد فنوپلاست، ۵۰٪ تولید جهانی را پوشانیده‌اند و استیل سلولوئیدها طی چند سال از ۲ تا ۳٪ به حدود ۱۲٪ تولید جهانی دست یافته‌اند.

گسترش صنایع فرآورده‌های جانشینی بر پایه سلولوز، روالی سریع و ممتد داشته است. این فرآورده‌ها نه تنها یک فهرست طولانی از کاربردها را تقدیم داشته‌اند بلکه انگیزه تغییر شکل‌های اولیه و قطعی تکنیک‌های تولید صنعتی نیز بوده‌اند. افزون بر اینها وجود آنها و کاربردهای رفته‌رفته انگیزه به کارگیری مواد خامی بوده است که تا آن زمان مورد استفاده قرار نمی‌گرفتند. نخستین لغزش مهم، همان‌طور که در صنعت مواد انفجاری دیده شد، در جایی اتفاق افتاد که عناصر دیگر تولیدی، جز سلولوز، به حساب گرفته شدند. این فرایند تحولی بعداً در دیگر صنایعی که بر پایه تغییر شکل‌های سلولوز، الیاف مصنوعی، و مواد پلاستیک قرار داشتند، برای تحریک پیدایش سنتزهای بزرگ آلی در شیمی صنعتی، در آستانه جنگ جهانی دوم، به ظهور رسیدند.





## دانش و تکنیک شیمی

عمل آوردن فراورده‌های طبیعی، مانند سلولوز، سپس زغال سنگ، در آغاز با روشهای صرفاً آزمایشی انجام می‌گرفت. اما همه می‌دانند که تقطیر قطرانهای زغال سنگ در آزمایشگاه، سبب آشنایی شیمیدانها با ترکیبات گوناگونی شد که تا آن زمان ناشناخته بودند و برای شیمی آلی، تعدادی مبانی تجربی تهیه کرد که در نیم سده، از ۱۸۲۰ - ۱۸۷۰ قوانین اساسی شیمی کربن روی آنها مستقر شدند.

مشتقات بنزن: گفت‌وگو درباره ترکیب و ساختار مواد کربنی، طولانی بود و گاهی هم تند می‌شد. تنها پس از کارهای استانیسلاو کانیزارو و ککوله و بالاخره کوپر<sup>۱</sup> بود که توافق روی مقدار اعداد اتمی (۱۸۵۰)، چهاروالانسی بودن کربن (۱۸۷۵ - ۱۸۵۸) و ساختار حلقه‌ای شش‌گوشه مولکول بنزن (۱۸۶۵) به عمل آمد و تحقیق صنعتی توانست بر دانش مطمئنی تکیه داشته باشد و موفقیت‌های درخشانی کسب کند.

پیش از این دوران، تولید نخستین رنگهای مصنوعی به مقیاس صنعتی رسیده بود و انواعی از فراورده‌ها به بازار فرستاده می‌شدند که هنوز نمی‌شد آنها را فراورده‌های جانشینی نامید. آنها در

1. Couper

واقع جانشین رنگهای طبیعی شدند، که تهیه و کاربرد آنها طی سده‌ها، یکی از پایه‌های تکنیکهای شیمی سنتی بود.

نخستین خانواده رنگها را مشتقات بنزن و بویژه مشتقات نیتروژنی آن به وجود آوردند. بنزن که با تقطیر قطرانهای زغال سنگ به دست آمده بود، حدود سال ۱۸۴۰ از معروفترین هیدروکربنها بود و فاراده در سال ۱۸۲۵ آن را شناسانید. کارهای فراوانی روی مشتق آمیندار بنزن، انیلین، انجام شد و آقای فریچ<sup>۱</sup> پس از آقای اوفردوربن<sup>۲</sup> در سال ۱۸۴۱ با فعل و انفعال روی نیل (اندیگویی طبیعی) آن را تهیه کرد که در آن زمان تنها، شناخته شده بود ولی از فرمول آن چیزی نمی دانستند. دو سال بعد، آقای آوگوست ویلهلم فون هوفمان، شیمیدان آلمانی، که در انگلستان اقامت داشت بنوبه خود آنیلین (نامی که فریچ روی آن گذاشته بود) را تهیه کرد. آقای هوفمان برای این کار، مشتق نیتروژندار بنزن را احیا کرده بود. روش هوفمان در تهیه آنیلین ارزانتر تمام می شد، اما چون این فراورده هنوز هیچ کاربردی نداشت، از محدوده آزمایشگاه خارج نشد.

آقای هوفمان که در این زمان توانسته بود برای آمینها یک نظریه کلی تنظیم کند به حل مسائل دیگری همت گماشت. وی بویژه یکی از دستیاران خود، آقای و. ه. پرکین<sup>۳</sup> را مأمور حل مسأله ترکیب هیدروکربن دیگری به نام آنتراسن کرد که از قطران زغال سنگ به دست می آمد. خود هوفمان روی کینین کار کرد که فرمول خام آن معلوم بود، اما وی می خواست روشی برای تولید مصنوعی آن بیابد.

آقای پرکین که در آغاز کار خود (۱۸۵۳) در آزمایشگاه هوفمان بیش از پانزده سال نداشت، با همان کارهای اولیه، آزموده شد. خودش به این مسأله دلبسته بود و به تحقیقات در آزمایشگاه کوچک خانگی خود ادامه می داد. وی در آغاز کوشید که آلایل تولویدین allyltoluidine را که ترکیب آمینه با فرمول خام  $C_{10}H_{13}N$  بود، اکسید کند. این فرمول تقریباً از نظر وزنی برابر نصف فرمول کینین  $C_{22}H_{24}N_2O_2$  (با حذف اکسیژن) بود. او که از فرمولهای گسترده، که بیست سال بعد مطرح شدند، اطلاعی نداشت، وسوسه شد که از هریک از دو مولکول یک هیدروژن بگیرد، بدین ترتیب، توانست با تثبیت دو اکسیژن، زمانی که آب تشکیل شد، آنها را به یکدیگر پیوند دهد. رنگهای آنیلینی: این کوشش به جایی نرسید. پرکین کار خود را این بار با ماده ساده‌تری، آنیلین، شروع کرد و ترکیب تیره جامدی به دست آمد. حال، آقای پرکین اندیشید که فراورده خود را در رنگری آزمایش کند و متوجه شد که توانسته است که رنگ قرمز عالی برای پارچه‌ها به دست آورد. وی بی درنگ برای یافتن روش ساخت صنعتی آن به کار پرداخت. او روش ارزان اختراعی آقای

بشان در ۱۸۵۳ را پذیرفت. در این روش نیتروبنزن، که با اثر گذاشتن مخلوط اسید نیتریک - اسید سولفوریک روی هیدروکربن به دست آمده است، با تحت تأثیر قرار دادن اسید استیک روی سیم آهن، احیا می‌شود. این اختراع را در ۱۸۵۶ به ثبت رسانید و سال بعد که کارخانه خود را با کمک مالی خانواده‌اش تأسیس کرد، به تولید آن پرداخت.

کار برجستهٔ پرکین فوراً شهرت یافت. وی معاصران خود را شگفت‌زده و همکاران خود را تحریک کرده بود. کار وی بازتاب گسترده‌ای یافت. وی نه تنها یک صنعت تازه ایجاد کرده بود (که این را هرکس بزودی فهمید) بلکه به فراورده‌های متعددی که کاربرد آنها در صنعت، کم و یا هیچ بود ارزش اقتصادی تازه‌ای بخشید. از آن جمله باید نخست از بنزن و همرده‌های بالاتر از تولوئن، و نیز از مشتقات آمینه، از اسید استیک، اسید نیتریک، اسید کلریدریک و غیره نام برد.

رنگهای دیگری که بر پایهٔ همین روش تهیه شدند بزودی شهرت یافتند. در فرانسه، ناتانسون<sup>۱</sup> رنگ قرمز دیگری با حرارت دادن آنیلین با کلروقلع به دست آورد. فراوردهٔ اولیه‌ای که روی آن عمل کرده بود مخلوطی دارای ترکیب نامشخص، با نسبت متغیری از آنیلین و تولوئیدین‌ها بود. آقایان ورگن<sup>۲</sup> از یکسوی و رنار از سوی دیگر در سال ۱۸۵۹ ساخت صنعتی فراورده‌هایی را شروع کردند که اولی آن را به افتخار ناپلئون سوم، قرمز ماجنتا<sup>۳</sup> نامید و دومی آن را، فوکسین fuchsine، که برابر نام رنار (روباه) در زبان آلمانی است.

تجربه‌گرایی: تکثیر رنگهای آنیلینی بدین طریق جز سالی چند دوام نیاورد. هر صنعتگر از روی نسخهٔ مخصوص خود عمل می‌کرد. تنوع مواد خام متناسب با روش تهیهٔ آنها بسیار گسترده بود و هرگز نتوانستند ترکیب شیمیایی دقیق آنها را مشخص سازند. مثلاً آنها بعدها دانستند که دو نوع تولوئیدین وجود دارند: ارتو و پارا. آنان روشهای بسیار گوناگونی را برای تغییر دادن روشهای آماده‌سازی اولیهٔ رنگ، با استفاده از مهارتهای شخصی، به قصد تولید رنگهای تازه‌ای از آنیلین به کار گرفتند. نسبت فراورده‌های به‌کار رفته، مدت و دمای پخت، روش تغلیظ و تکمیل کاری این فراورده در همهٔ موارد طبق قواعد تجربی بود و هیچ‌گونه خصلت عمومی نداشتند. این قواعد را تا مدتها پس از اینکه اطلاعات علمی بدقت مشخص شدند باز رعایت می‌کردند. هنوز در سال ۱۹۰۳ هم کتاب مهم شیمی صنعتی نوشتهٔ آقایان واگنر و فیشر در چاپ شانزدهم خود به زبان آلمانی، در فصل مربوط به رنگهای مصنوعی، یک ردیف نسخه‌هایی از نوع زیر را آورده است:

1. Natanson 2. Verguin

۳. Magenta به ایتالیایی، ماجنتا، شهری در ایتالیای شمالی در ناحیهٔ لومباردی. در سال ۱۸۵۹. در این ناحیه،

ناپلئون سوم ارتش اتریش را شکست داد. - م.

«در دیگ پخت رنگ مواد زیر ریخته می‌شود: ۷۰۰ کیلوگرم اسید ارسنیک (۷۵ درجه بومه)، ۳۰۰ کیلوگرم اسید ارسنیک احیا شده (۷۵ درجه بومه)، ۳۰۰ کیلوگرم آنیلین برای رنگ قرمز و ۲۰۰ کیلوگرم مواد فراری از تقطیرهای پیشین ... اینک اجاق را (از ساعت شش صبح) روشن می‌کنند و تا هفت ساعت (ساعت یک یا دو بعدازظهر) گرم کردن ادامه می‌یابد، آنگاه تقطیر آغاز می‌شود. حال حرارت را چنان تنظیم می‌کنند که در هر ساعت ده لیتر محصول تقطیر داشته باشیم. در پایان بیست ساعت، آتش را تندتر می‌کنند تا در هر ساعت بیست لیتر محصول تقطیر به‌دست آید. زمانی که محصول تقطیر به ۴۰۰ لیتر برسد، محلول تقطیرشونده، قوام یافته است ... برای اینکه لحظه قطع عملیات دانسته شود، تجربیات زیادی لازم است ...» سپس یک ردیف عملیات ذکر می‌شود تا محلول تقطیرشونده از لحاظ استخراج فوکسین خام و خالص کردن آن آماده شود: «فوکسین خام، علاوه بر فوکسین، کریزانیلین، موانیلین، ویولانیلین محتوی مواد دیگری هم هست که هنوز شناخته نشده‌اند.»

صفت رنگ با وجود نوپایی و داشتن ظاهر تکنیکی با پایه عملی، چهل و پنج سال بعد از تولد ظاهراً هنوز از حال و هوای صابون‌پزی سنتی خارج نشده بود. این نسخه‌ها با داشتن خصلت تجربی، دستورکار نه‌تنها پیشه‌وران کوچک، بلکه دیگران هم بودند. این صنعت جذیبه در انگلستان زاده شده بود پیشرفت واقعی خود را در آغاز دهه ۱۸۶۰ در آلمان یعنی در کشوری که پیش از جنگ جهانی اول، در این رشته در جهان پیشتاز بود داشته است.

با این وجود، درگامهای نخستین این صنعت، چند مفهوم ابتدایی مشخص شدند. این واقعیت که رنگهای آنیلینی باید به گروه تری فنیل‌متان و مشتقاتش وابسته باشند ظاهراً خدمت چندانی به کارهای آزمایشگاهی و کارگاهی نکرده است. اما مفهوم لوکوبازها<sup>۱</sup> برای جهت‌یابی و کاربرد رنگهای جدید دارای سودمندی فوری‌تری بود. صنعتگران در رنگرزیها فراورده‌های بیرنگ تهیه می‌کردند که با اکسید شدن روی نخ رنگی می‌شدند. این روش برای رنگرزیها ناشناخته نبود، علاوه بر آن این کار را از سده‌ها پیش بانیل و پاستل نیز انجام می‌دادند. برای شیمی، این کاری ساده - گرچه غیرمنطقی - بود که فراورده‌های مصنوعی را با مهارتهای سنتی تکثیر کنند.

رنگهای دونیتروژنی: موفقیت سریع در کار تهیه رنگهای آنیلینی، ردیف تازه‌ای از رنگها را موجب شد که بر پایه کاربرد ترکیبات گوناگون، بویژه فنولها و مشتقات آنها و نیز واکنشهایی که هنوز ناشناخته بودند ساخته می‌شدند.

۱. از واژه یونانی leukos به معنای سفید یا بیرنگ، بخش بیرنگ مواد رنگی است؛ کاربینولها  $\text{Ar-COHL}$  یک لوکوباز است. - م.

نسل دوم رنگهایی مصنوعی از حدود سال ۱۸۶۰ پدیدار شد. این زمانی بود که آقای پتر کریس<sup>۱</sup> واکنش دینیتروژندار کردن را با ایجاد پیوند دوگانه‌ای میان دینیتروژنی که در هسته‌های بنزنی تثبیت شده‌اند، کشف کرد. ترکیب نخستین رنگهای دینیتروژنی، کمی بعد، با فرمول زیر نمایش داده شد:  $C_6H_5-N=N-C_6H_5$  و اولین کروموفوری (ماده رنگ‌ساز) بود که شناخته شد. یک هسته ساده بنزنی را می‌توان با مشتقات، مثلاً فنولی هیدروکربنهای دیگر حلقوی و مشتقات آنها تعویض کرد. بدین ترتیب، در برابر گستره تازه‌ای از ترکیبات قرار گرفتند. که با الحاق گروههای اوكسوكرومی (رنگیار) به آنها، برای اینکه به رنگهای حقیقی تثبیت شونده روی نخها تبدیل شوند، دامنه آنها باز هم گسترده‌تر شد.

کارهای آقای کریس درباره دی‌آزوها در سالهای ۱۸۵۸ - ۱۸۶۴ ادامه داشت. نخستین رنگ آزویی، قهوه‌ای فنیلن، قهوه‌ای بیسمارک را او با همکاری آقای کارو<sup>۲</sup> در سال ۱۸۶۷ به دست آورد. فرآورده‌های دیگری پس از مدت زیادی تهیه شدند. در سال ۱۸۷۶ آقای ویت<sup>۳</sup> شروع به ساخت یک دی‌آمینو دی‌آزوبنزن  $C_6H_5-N=N-C_6H_3-(NH_2)_2$  کریزوئیدین کرد که ویژه رنگ زرد برای پنبه بود که با تانن (مازو) دندانه می‌شد. این نوع رنگهای مستقیم یا با دندانه افزایش یافتند. حدود سال ۱۸۸۰ آقای روسن<sup>۴</sup>، شیمیدان فرانسوی، وسیله تهیه آنها را با نفتولها یافت. مفاهیم اصطلاحات auxochrome (رنگیار) و chromophore ماده رنگ‌ساز را ما مدیون آقای ویت در سال ۱۸۷۶ هستیم.

آقای آدولف فون بایر که بعدها با سنتز اندیگو، شهرت یافت راه پیدایش نسل سوم رنگهای مشتق از فنولهای گروه تری فنیل متان را با ساختن فنول فتالئین در سال ۱۸۷۲ گشود. چهار سال بعد، آقای ه. کارو بنوبه خود فلوئورستین را به دست آورد که با مشتقات یددار و برم‌دار یا نیتروژندار آن ردیف آئوزین‌ها را تهیه کردند که رنگهای تابنده‌ای هستند که در ردیف بسیار موزونی در کمتر از ده سال به بازار آمدند.

شکوفایی صنعت رنگ: شیمیدانها که در این دوران از پیکربندی (کنفیگوراسیون) مولکولهای ترکیبات آروماتیک اطلاع بیشتری یافته بودند در کار جفت کردن و وارد کردن عناصر تازه‌ای، مثلاً گوگرد، با بلود و متیلن، بازهم ابتکار آقای کارو، به آنها مهارت بسیار زیادی یافته بودند. در واقع نخستین رنگ گوگرددار به شکل بسیار تجربی از پهنه شیمی بیرون داده شد، پهنه‌ای که در زمینه‌های دیگری نیز، مثلاً عکاسی، فعالیت بسیار تب‌آلود اما خیلی کم بهره داشت. در سال ۱۸۷۴ دو

صنعتگر از لاول، دم اره چوب، کاغذ پاره با گوگرد و یک قلیا را با یکدیگر مخلوط کردند و از بخت خوش از این مخلوط، رنگ قهوه‌ای به دست آوردند که بدون دندانه، نخها را رنگ می‌کرد. این رنگ با نام قهوه‌ای لاول به بازار آمد.

گرچه این رنگ به علت بوی بد آن مورد علاقه رنگرزان نبود، اما پانزده سال بعد، جهت تحقیقات شیمیدانها را برای تهیه رنگهای قهوه‌ای دارای همان خاصیت رنگرزی، تعیین کرد. آقای ویدال<sup>۱</sup> در فرانسه، نخستین کسی بود که تولید رنگ را براساس بنزوکینون مورد تحقیق قرار داد و سولفورهای قلیایی را بر آن اثر می‌داد. دیده شد که رنگهای: پریمولین ساخته ا. ج. گرین، بنفش ساخته لاوت<sup>۲</sup> و ردیفی مطول از رنگهای گوگردی به بازار سرازیر شدند.

این شکوفایی گسترده در کمتر از نیم سده چندین صد ماده رنگی ایجاد کرد که شیمیدانها برای تنظیم و طبقه‌بندی آنها، غالباً برپایه معیارهای گوناگون می‌کوشیدند. به دنبال این کارها نامگذاری وسیعی در کار آمد، و نیز نظریه‌های چندی روی قدرت پوشش رنگها، و کاربرد آنها عرضه شد. موفقیت این تشتت بزرگ در عمل منجر به این شد که رنگرزه‌ها مجهز به وسایلی گردند که بتوانند با آنها مشکلات کار خود را برطرف سازند و راه‌حلهایی برگزینند که برای نخهای گوناگون، از جمله نخهای مصنوعی جدید، مشتق از سلولوز، بهترین نتیجه را داشته باشند. گروههایی از این مواد رنگی، مثلاً رنگهای آنیلینی، بسرعت به توسط رنگهایی که بتازگی وارد بازار شده بودند بی‌اعتبار گشتند. اما تا پایان سالهای ۱۸۶۰ هیچ‌کدام از آنها، محصول آزمایشگاهی فرآورده‌های طبیعی با منشأ گیاهی نبودند.

عطرهای مصنوعی: شیمیدانهای آلمانی با سنتزهای پیاپی الیزارین، سپس اندیگو، راه را باز کردند. در واقع سنتز واقعی در میان نبود زیرا این روشها برپایه آنتراسن در مرحله نخست و نفتالین در مرحله دوم و کربنهای آروماتیک به دست آمده از تقطیر جزء به جزء قطرانهای زغال‌سنگ، قرار داشتند. کارهای چشمگیر آقای برتو در سنتز استیلن و نتایجی که از آن در سالهای ۱۸۵۰ گرفته شد، نشان داد که اصولاً می‌توان ادعا کرد که سنتز کلی هر ترکیبی از کربن امکان دارد. این ادعا از نظر مادی، تنها یک سده بعد یعنی زمانی به اثبات رسید که ساخت ترکیبات ساده‌ای نظیر استیلن، اتیلن، اکسید کربن و هیدورژن اقتصادی شده بودند.

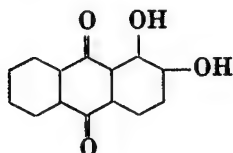
آقای پرکین در سال ۱۸۶۸، در آستانه انجام کارهای سرنوشت‌سازی در سی‌وهشت سالگی، توانست کومارین، انیدرید یک اسید اتیلنی مشتق از بنزن را تهیه کند. این ترکیب را در آن زمان

یک آلدئید،  $C_6H_4 \begin{matrix} O-CO \\ | \\ CH=CH \end{matrix}$ ، ترکیب اسانسی بعضی از عطرها، می‌دانستند. در آن

زمان از چند فرآورده ساده جانشینی برای صنعت عطرسازی، سالیسیلات دو متیل برای اسانس وینترگرین Wintergreen، آلدئید بنزینیک برای اسانس بادام تلخ و نیتروبنزن برای اسانس میربان Mirbane در سایه کارهای کائور- و بعداً لاوت و ادوارد گرمو- آگاه بودند. چند سال بعد، کار آقای پرکین، سپس تحقیقات گریه<sup>۱</sup> و لیبرمان درباره الیزارین، انگیزه یک رشته تحقیقات درباره ترکیبات عطرها طبیعی شد. پژوهشگران خود را در برابر رنگهایی یافتند که از رنگهای مورد تحقیق شیمیدانهای آلمانی ترکیب ساده‌تری داشتند: الکل، اتر، آلدئید، ستون، فنول، مشتقات نیتروژندار و ... تهیه صنعتی آنها بزودی شروع شد.

سال ۱۸۷۶ را می‌توان سال آغاز ساخت عطرها مصنوعی دانست.

الیزارین: باز در سال ۱۸۶۸ بود که آقایان گریه و لیبرمان توانستند رنگ اصلی روناس، الیزارین را جدا سازند با تقطیر آن روی گرد روی، طبق روشی از احیا، که کلاسیک شده بود، موفق شدند هیدروکربنی به نام آنتراسن به دست آورند. از این کارها نتیجه گرفتند که الیزارین مشتقی از ستون مربوطه، آنتراکینون، است که برای نخستین بار در سال ۱۸۲۶ با اکسایش آنتراسن به دست آمد. الیزارین باید نوعی دیوکسی آنتراکینون<sup>۲</sup> باشد.



و آنها این جسم را از ستون و با ایجاد دو گروه هیدروکسید (OH) با دخالت مشتق برم‌دار، به دست آوردند. تصادف چنان خواست که آنها پیکربندی مولکولی مناسب را تعیین کنند زیرا موقعیتهای دیگری هم ممکن بود و هیچ کدام الیزارین نمی‌دادند.

این توفیق از نظر تاریخی مانند موفقیت پرکین در ده سال پیش از آن بود. اما کاربرد برم تحت فشار، در مقیاس صنعتی، هزینه و خطر زیادی را پذیرا می‌شد. آقای پرکین و چند شیمیدان دیگر این روش را، که چندی بعد به تولید صنعتی رسید، عملی کردند. در این روش یک مشتق سولفوندار

1. Graebe

۲. فرمول کامل هسته بنزنی چنین است که برای آسانی ضبط، پیوند دوگانه و نیز گروههای CH این

هسته‌ها نشان داده نشده‌اند. - م.



آنتراکینون تهیه می‌شد، این مشتق را با ذوب قلیایی به عمل می‌آوردند.

مانع دیگری پیش آمد، و آن بهای گزاف اسید سولفوریک غلیظ بود که در مقادیر کم در نوردها وزن (ساکسونی) و بوهیمیا به روش سنتی تخریب خشک سولفات در قرق تهیه می‌شد. این روش زمانی کنار نهاده شد که تهیه اسید سولفوریک با روش مجاورتی که اصول آن را آقای کلمنز وینکلر در ۱۸۷۰ تعیین کرده بود در مقیاس صنعتی به توسط BASF برپایه کارهای کنیچ عملی شد. تولید صنعتی الیزارین کسادی کشت روناس را در ناحیه میدی فرانسه به دنبال آورد. در بهترین سالهای رنگهای طبیعی، خرید و فروش آن رقمی حدود ۴۲/۵ میلیون فرانک (آن زمان) در سال بود. در سال ۱۸۶۸، ده سال پس از ساخت مووین بوسیله پرکین، این رقم به کمتر از ۳۱ میلیون کاهش یافت و بازده سال بعد از موفقیت‌های گریه ولیرمان به چهار میلیون رسید که چند سال بعد بکلی موقوف شد.

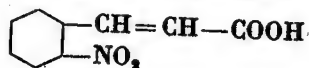
سنتز اندیگو: آخرین موفقیت بزرگ این سده در ساخت رنگهای مصنوعی نصیب ا. فون بایر و گروه شیمیدانهای BASF شد. اجرای سنتز اندیگو، نمایش جالبی از کار پژوهشی صنعتی است که تکیه بر شناخت‌های دقیق ساختمان مولکولی جسم مرکبی دارد که قرار است ساخته شود. این هم از نمونه‌های بزرگ یک پژوهش سرسختانه است که مدتی نزدیک به سی سال به ابتکار یک مؤسسه بزرگ صنعتی ادامه داشت، مؤسسه‌ای که از هزینه کردن یک میلیون لیره برای ساخت فرآورده‌ای جهت جانشینی یک ماده طبیعی بیمی به خود راه نداد و انحصار بازار جهانی را برای خود تأمین کرد. برپایه نوشته‌های تاریخی بین شیمی صنعتی کلاسیک سده نوزدهم و شیمی شکوفا در نیمه سده بیستم، در اثر نوعی تحول پیوسته تکنیک‌هایی که منظم‌اً دنبال می‌شدند شکافی ایجاد شد.

مسئله ترکیب شیمیایی مواد رنگینی که از چند گیاه از نوع indigofera که در آنسوی دریاکشت می‌شوند و به‌طور سنتی در رنگریزی با نام نیل به‌کار می‌روند طبیعتاً باید در مخیله کارشناسان شیمی صنعتی در این نیمه دوم سده نوزدهم خطور کرده باشد. آقای بایر از سال ۱۸۶۹، درست پس از کارهایی که در مورد الیزارین به عمل آمد، بدان توجه کرد. اما تحقیق در این باره، طولانی و پریچ‌وخم بود.

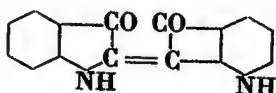
وی از اندیگو، یک ترکیب نیتروژندار با نام اندول C1=CC2=C(C(=N1)C(=O)N2)C استخراج کرد و این امر سبب

شد که ساختار اندیگو را دریابد. دو سال بعد دو شیمیدان دیگر با نام‌های امرینگ<sup>۱</sup> و انگلر<sup>۲</sup> توانستند اندیگو را با بهره کمی به‌دست آورند. آنان برای این کار ترکیب نیترواستوفنون را با گرد روی به عمل

آوردند. گفته شده است که در این روش از کار اولیه گریبه و لیبرمان الهام گرفته شده است. روشهای گوناگون دیگری در چند سال، بدون اینکه موفقیتی داشته باشند پیشنهاد شدند. آقای بایر، تنها در سال ۱۸۷۸ خود حل مسأله را عهده دار شد. وی با مشتق نیتروژندار دیگری از اسید سینانیک که در عطر سازی آن زمان به کار گرفته می شد با فرمول



کرد. نتیجه این رشته جدید تحقیقات این بود که وجود ماده ایزاتین در *isatine* اندیگو شناخته شد و در سال ۱۸۸۳ فرمول دقیق مولکول اندیگو را مشخص کرد، که از دو مولکول ایزاتین تشکیل شده است که توسط یکی از کربنهای بدون اکسیژن خود، به یکدیگر وصل شده اند.



وی از مشتقات بنزن به عنوان نقطه آغاز صرف نظر کرد. تشکیل حلقه دوم نیتروژندار با این مشتقات به وجود می آمد و اتصال این دو هسته، بسیار جزیی بود، وی روی مولکول نفتالین کار کرد. آقای بایر دست به کار شکستن یکی از حلقه های بنزنی شد. برای این کار با عبور از مرحله اسید فتالیک و دی آمید مربوطه O=C1C=CC(=O)Nc2ccccc21 و اسید آنترانیلک

آن را به یا حلقه نیتروژندار و کربوکسیل دار تبدیل کرد.



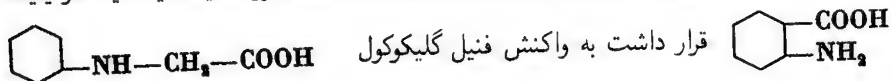
نخستین واکنش، که اکسایش نفتالین بوسیله اسیدسولفوریک بود، تصادفاً بوسیله جیوه یک دماسنج شکسته شده تسریع شد، جیوه همچون کاتالیزور عمل کرد. رشته تازه ای از تبدیلات به کمک اسیدکلرواستیک، بعد با یک ذوب قلیایی<sup>۱</sup> سبب شد که به ساختار اندوکسیل دست یابد که فرمول آن به ایزاتین بسیار شباهت دارد و یک اکسایش ساده بوسیله هوا آن را به اندیگو تبدیل می کند. وانگهی ترکیب اخیر در همان دیگ رنگ سازی ایجاد می شود و فراورده ای که به مصرف کنندگان داده می شود لوکوباز اندوکسیل است.

این رشته واکنشها، دشوار بودند اما بازده آنها برای اینکه به یک ماده صنعتی تبدیل شوند کافی بود. در تمام طول این تحقیقات، یک سلسله اختراعات به ثبت رسیده از نتایج به دست آمده ساخت صنعتی فنول به روش ترکیب سولفونیک اسیدها با سود می باشد. - م.

حمایت می‌کردند.

از بین عواملی که به فون بایر و همکارانش امکان دادند تا به نتایج قابل قبول برای این صنعت برسند، یکی دسترسی آزاد به اسید سولفوریک غلیظ بود که صنعتی شدن روش مجاورتی موجب چنین و فوری شده بود و نیز عمل الکترولیز کلرورسدیم، که برای تهیه هیپوکلریت مورد نیاز در واکنش سوم و اسید کلرو استیک مورد نیاز واکنش چهارم لازم بودند. مؤسسه BASF که بخوبی با این وسایل مجهز بود - و شاید در جهان تنها مؤسسه‌ای بود که همه این وسایل را داشت - در ۱۸۹۷ اندیگویی سنتزی را به بازار فرستاد. طی چند سال کشت گیاه روناس در سراسر جهان به طرف رکود رفت اما نه با آن سرعتی که در ساحل، مدیترانه‌ای فرانسه نابود شد.

چندین واکنش فون بایر در سالهای ۱۸۹۰ بوسیله شیمیدانهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند. روش اصیل BASF سریعاً ساده شد و پس از ده یا پانزده سال که مؤسسات انگلیسی و امریکایی آن را دنبال کردند، روشهای خاص خود را به‌کار انداختند. فرانسه از لحاظ بارزگانی بیشتر گرفتار بود زیرا این کارخانه آلمان شعبه‌هایی در آنجا داشت که لوکوباز خود را از آلمان دریافت می‌داشتند و درجا از آن استفاده می‌کردند. روش فرانسه که بر پایه آنیلین و اسید کلرو استیک، یا اسید آنترانیلک



واندوکسیل تغییر یافت. در واقع، زمانی که پراتیک این تغییر شکلهای به‌حد صنعتی رسید، تعدادی راههای گوناگون برای ساخت این ترکیب، انعطاف‌پذیرتر شدند. مشتقات اندیگو را سرعت با تعویض هر دو گروه NH با گوگرد، تیواندیگو قفائی برای پنبه، تعویض برم با دو هیدروژن روی حلقه‌های بنزنی تولید کردند. این رنگهای که سیبا *Ciba* آنها را می‌ساخت تشکیل گامی از آبی تا شرابی را دادند و آن رنگ ارغوانی که در جهان باستان از نرم‌تنانی به‌دست می‌آمد از نو به‌کار گرفته شد، زیرا فرمول آن دقیقاً دی‌برمو اندیگو می‌باشد.

## وسایل فیزیکی صنایع شیمیایی

در طی سی سال پایانی سده نوزدهم، صنعت شیمی بر کاربرد وسایل فیزیکی تولید، سرما و برق، که باید در رأس عوامل اصلی قرار گیرند مهارت یافت زیرا این امور پایه وسایل مورد استفاده کنونی ما هستند. هر چند که این دو تکنیک از یکدیگر کاملاً متمایز هستند روشهای کاربرد آنها بوسیله شیمی صنعتی، شباهتهایی با یکدیگر دارند. نخست اینکه پدیده‌های فیزیکی مبنای این وسایل، حدود نیم سده برای سرما حتی مدت زیادتری پیش از آنکه مرحله کاربرد صنعتی آنها شروع شود، شناخته شده بودند. شناخت علمی آنها با آهنگ نسبتاً سریعی دنبال شد و موضوعهای پژوهشی آنها نیز در زمان خود بسیار پراهمیت بودند. با این همه، نظریه پردازان و تجربه‌گران آزمایشگاهی هرگز دلمشغولی کاربرد صنعتی آنها را نداشته‌اند. تکنسین‌ها به موازات فیزیکدانان فعالیت می‌کردند، اما تکنسین‌ها بر فیزیکدانان، جز دریافتن اصول کلی و راه حل مسائل شخصی، یعنی معنی روشهای عملی و اصلاح وسایل به‌کارگیری این روشها، پیش بودند. وسایل فیزیکی پس از گذراندن یک مرحله نسبتاً کوتاه تحقیقات فنی، امکان ساخت اجسامی را که در طبیعت فراوان هستند از قبیل: نیتروژن، اکسیژن، هیدروژن و کلر، به مقدار زیاد و با هزینه کمی بالا، فراهم ساختند.

برای ساخت این اجسام شمار زیادی از فراورده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند، اما بدون اینکه، به استثنای کالر، ساخت آنها واقعاً رواج یابد. وانگهی اجسام زیادی، از جمله گازهای کمیاب، فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی را توانستند با شرایط خوب اقتصادی تهیه کنند، و بدین ترتیب، آنها به مواد خام موجود برای دیگر فعالیتهای مهم صنعتی تبدیل شد. طبیعی است که روشهای صرفاً متالورژی که ایجاد و گسترش آنها مورد بررسی قرار گرفتند، نباید فراموش شوند.

## سرما و مایع کردن گازها ماشینهای سرمازای

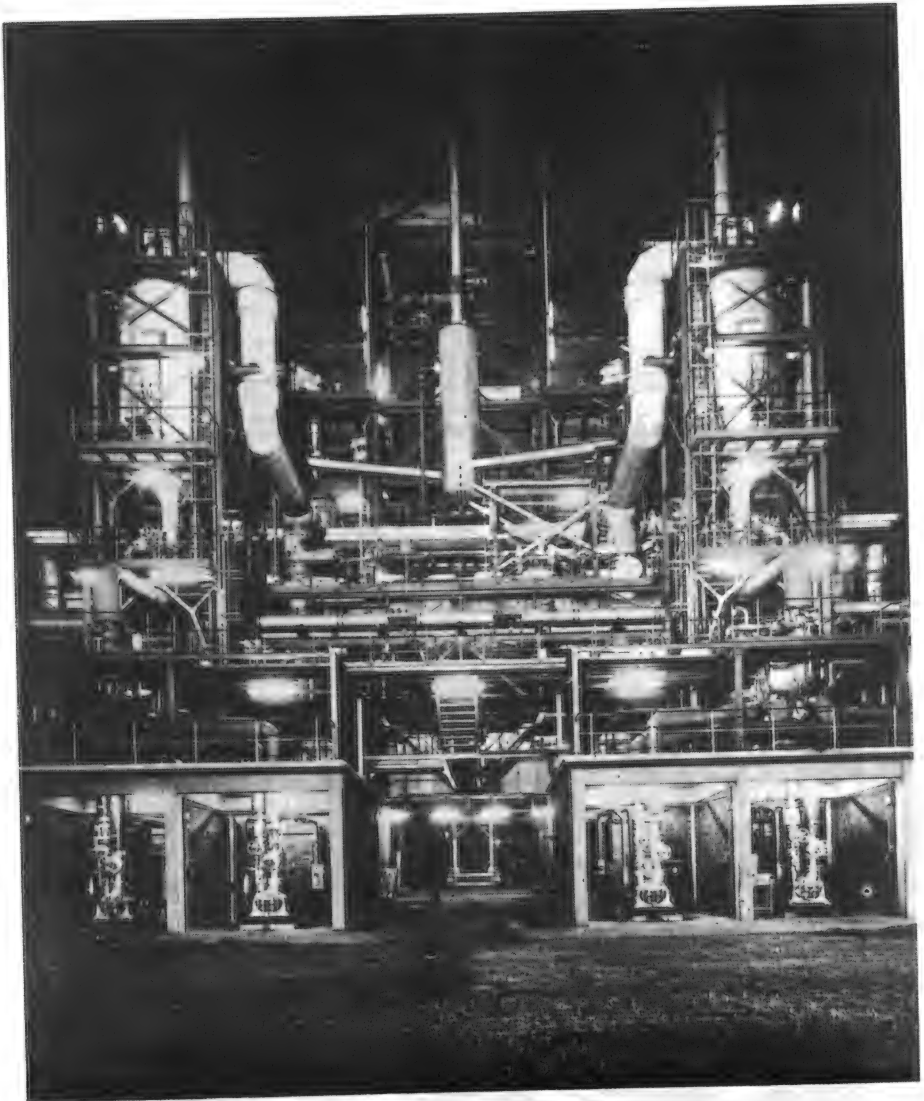
شماری مشاهدات بدون ارزش یا تجربیات ارزشمند آزمایشگاهی در دوره بین اواخر سده هجدهم و اواسط سده نوزدهم، این گمان را رواج دادند انقباض یک گاز، سبب گرما می‌شود و انبساط آن سبب سرما. ماشینهای اولیه سرمازای بر پایه انقباض و سپس انبساط عوامل بسیار ابتدایی نظیر هوای جو، ساخته شدند. هوای منقبض بین دو فاز در یک سردکننده آبی خنک می‌شد.

یخ طبیعی: تنها هدفی که در سال ۱۸۶۰ دنبال می‌شد تولید یخی بود که دادوستد آن به علت بویژه نیازهای تازه صنایع یا حمل و نقل مواد خوراکی بیش از پیش اهمیت می‌یافت. یخ طبیعی کشورهای شمالی یا کوهستانی و زمستانهای نواحی معتدل، تنها منبع غنی یخ بودند. اما یخ طبیعی غالباً دارای ناخالصیهایی مضر بودند و بنابراین، غیرخوراکی، از آنها در سردخانه‌ها، انبارهای کشتیها و در صورت نیاز در برخی صنایع، مثلاً آبجوسازی استفاده می‌شد. برای استفاده در روی میز غذا، آب آشامیدنی را با مخلوطهای خنک‌کننده، یخ ریز و نمکهای قلیایی سرد می‌کردند. تولید این یخ بسیار کم بود.

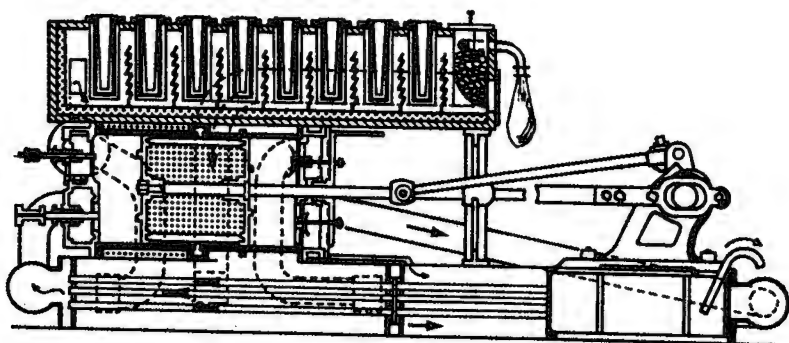
ماشین سرمازایی با دتانت هوا: همین‌که کمپرسورهای با بخار آب با کارکرد رضایتبخش و بهای مناسب ساخته شد، تصور ماشینهایی که تنها با دتانت هوای فشرده ایجاد سرما کنند آسان گردید. چنین می‌نماید که نخستین ماشینی از این نوع، ساخت یک آمریکایی به نام جان گوری<sup>۱</sup> بود که در سال ۱۸۵۱ آن را به ثبت رسانید؛ این ماشین برای خنک کردن سالنهای بیمارستانها ساخته شده بود. یک صنعتگر آلمانی که گویا مهارت زیادی در این نوع کارها داشت با نام وینتهاوزن<sup>۲</sup> در سال ۱۸۵۵ نخستین ماشین واقعی باد سرد را برای ساختن یخ طرح کرد، که بعدها مدل همه ماشینهای یخساز شد. آقای وینتهاوزن در سال ۱۸۶۹ اختراع طرح یک مدار بسته از هوا را داشت که با یک‌بار دتانت و تولید یخ، وارد یک تبادلاگر گرمایی لوله‌ای می‌شد که در آنجا هوایی را که از



تابلوی ۲۳. چاههای نفت در یک ناحیه تیتسویل.



تابلوی ۲۴. کارخانه تولید اتیلن از نفت (حدود ۱۹۶۵).



شکل ۴۰. ماشین یخسازى وستینگهاوس.

بدنهٔ ماشین خنک‌کننده‌ای دارد که در لوله‌های آن از یکسو آب سرد و از سوی دیگر، هوای فشردهٔ سرد جریان دارند (قسمت راست). هوای فشردهٔ سرد وارد سیلندر تلمبه سمت چپ پیستون می‌شود. این هوا به‌هنگام وارد آوردن فشار در قسمت راست، منبسط می‌شود و وارد قسمت یخساز در بالا می‌شود که ظرفهای یخ در آنجا گذاشته شده‌اند. سپس به قسمت پایین (قسمت چپ) باز می‌گردد و در آنجا بین هوای انبساط یافته و هوای فشرده‌ای که از قسمت راست سیلندر تلمبهٔ هوا خارج می‌شود، تبادل حرارت انجام می‌گیرد.

کمپرسور می‌آمد خنک می‌کرد (شکل ۴۰). دمای باد کمپرسور توسط لایه‌ای از آب که دور سیلندر کمپرسور می‌گردید و در بخش خنک‌کننده وارد می‌شد پایین می‌آمد. در پایان مدار، هوای انبساط یافته، خنک، از نو در سیلندر کمپرسور وارد می‌شد.

دنانت هوای فشرده و خنک شده در سیلندر کمپرسور، و روی جبهه‌ای از پیستون در زمان فشار حجم دیگری از هوا روی جبههٔ دیگر انجام می‌گیرد. احتمالاً این همان امکان دانانت در اثر کار خارجی مورد بحث شدید در سی سال بعد است که از اندیشهٔ آقای وینتهاوزن گذشته است. وانگهی، در مدل نهایی، ماشین او که در سال ۱۸۷۱ ساخته شد، دانانت در سیلندری غیر از سیلندر کمپرسور انجام می‌گرفت و این خصیصه به گفتهٔ یکی از معاصرانش «از لحاظ بازده کار بسیار بهتر است» که احتمالاً برای این سیستم و در آن زمان درست بود.

در سال ۱۸۶۷، ماشینی از نوع وینتهاوزن در فرانسه ساخته شد که تهویهٔ کاخ نمایشگاه عمومی پاریس در شان دومارس<sup>۱</sup> را تأمین می‌کرد. آقای پل ژیفار در سالهای ۱۸۷۰ ساخت همین نوع ماشین را در فرانسه عهده‌دار شد و بزودی کارگاههای دیگری در انگلستان و آمریکا بدان روی آوردند.

1. Champ-de-Mars



ماشینهای دتانت هوای جو، از جهت یخسازی، موفقیتی سریع اما کوتاه مدت داشتند. این ماشینها به علت کمی حجم گرمایی هوا، همیشه ناگزیر بزرگ و در نتیجه سنگین و جاگیر ساخته می شدند. آنها پس از مدت کوتاهی، ویژه عملیات یخسازی یا خنکسازی در بعضی از صنایع و سردخانه ها، بخصوص برای نگهداری گوشتهای یخ زده شدند. با این حال، وجود آنها، در تبلیغ صنعت سرما تأثیر زیادی داشت.

ماشینهای تبخیر: روش دیگری که تقریباً در همان ایام برای ساختن ماشینهای سرمازا به کار گرفته شد به نتایجی بسیار مهمتر دست یافت. سرمازایی با جذب گرمای تولید شده از تبخیر مایعهای تبخیر شونده ایجاد می شود. این اجسام می توانند مایع در دما و فشار معمولی، یا گازی و مایع شده، در اثر کاهش دما و یا افزایش فشار، یا با ترکیبی از هر دو عامل باشند. اما طرز عمل هرچه باشد، این ماشینها یک کمربند گرم و یک کمربند سرد دارند که چرخه تغییر شکلهای سیال بین آنها حفظ می شود.

دو پژوهشگری که با توفیقهایی متفاوتی به ساخت این ماشینها دست یازیدند عبارت بودند از دو فرانسوی به نامهای فردینان کاره و شارل تلیه. آقای کاره خیلی زودتر، از سال ۱۸۵۷ دست به کار شده بود. وی نخست از اتر سولفوریک به عنوان ماده سرمازای استفاده می کرد. در این زمان پژوهشگران دیگری مانند شاو و هریسون در انگلستان از همین ماده برای همین کار استفاده می کردند. هر دو نفر چیزی جز تکرار تجربه جان لزل<sup>۱</sup> فیزیکدان اسکاتلندی، که در سال ۱۸۱۷ جذب گرمای برخاسته از تبخیر بخار آب در زیر کاسه یک تلمبه هوایی را آشکار کرد، کار دیگری انجام ندادند. یک استکان اسید سولفوریک که در زیر کاسه گذاشته شده بود، بخارهای ناشی از انبساط را جذب می کرد و پدیده تبخیر ادامه می یافت. اتر سولفوریک مدت چند سال در ماشینهایی به کار می رفت که یک تبادُلگر حرارتی لوله ای، یخساز، داشتند که اتر در آن به علت وجود یک خلاء جزئی تبخیر می شد. تلمبه ای که یک ماشین بخار آن را به کار می انداخت، این خلاء را به وجود می آورد. بخارهای اتر بعداً در یک خنک کننده مارپیچی مایع می شدند. جریانی از آب نمک بین ظرفهای هر یک از قسمتها، یخ زدن آب بطریهایی را که در فرورفتگیهای قسمت یخساز گذاشته می شدند و نیز سرد شدن بخارهای اتر را تأمین می کرد.

در سالهای ۱۸۶۰ در شهرهای بزرگی چند واحد بزرگ از این نوع نصب شدند، اما آنها معایبی داشتند. ماشینهای ساخت آقای ریزه برای یخسازی در شهر پاریس، ائتلاف اتر در هر ماشین در سال حدود ۱۲۵ کیلوگرم بود، درحالی که ظرفیت اتر آنها بیش از ۴۵ کیلوگرم نبود. به علت بهای

بالای اتر و اشتعال پذیری آن، این یخسازها پس از مدت کوتاهی کنار گذاشته شدند.

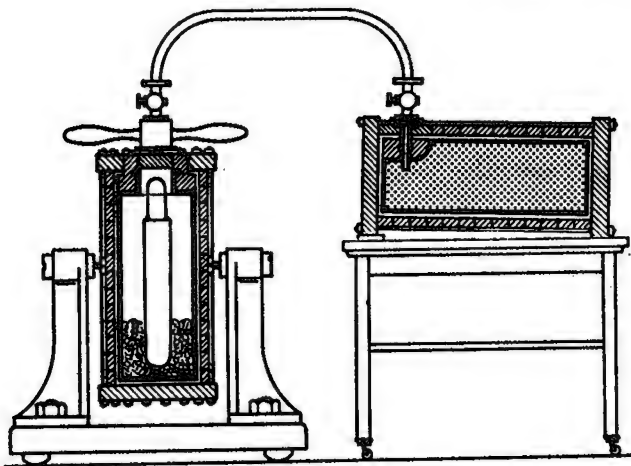
کلرور متیل و آمونیاک: آقای شارل تلیه، چند سال پس از کاره، اتیل متیلیک را، که بسیار آسان آن را تهیه می‌کرد، به کار گرفت. اما این گاز، هنوز، حتی در آزمایشگاه‌ها، کمیاب بود. آقای تلیه نخستین ماشین یخساز خود را در سال ۱۸۶۲ ساخت و مدت چند سال، حتی زمانی که آمونیاک به کار می‌رفت از اتر متیلیک استفاده کرد.

سرانجام نخستین ماشین سرمازایی که بخوبی پاسخگوی صنعت نوین یخساز بود با کاربرد آمونیاک ساخته شد. چندین صنعتگر به مزایای آمونیاک پی بردند و محققاً آنها بر اثر آزمایشهای فاراده متوجه این امر شده بودند. تحقیقات فاراده در سال ۱۸۲۳ در کتابهای فیزیک بتدریج منعکس می‌شد، که یکی از آنها مربوط به گذاردن ماده‌ای در یک لوله خمیده است که با گرم کردن یک ترکیب گازی، هیدرات کلر، مخلوط اسید کلریدریک و سولفور آهن، محلول آمونیاک در کلرور نقره را آزاد می‌کند. این لوله به شکل لامپها مسدود شده بود و این ماده در یکی از آنها مربوط به گذاردن ماده‌ای در یک لوله خمیده است که با گرم کردن این ماده، گاز آزاد می‌شد و در شاخه سرد در اثر فشاری که درون لوله بالا رفته بود، مایع می‌شد.

در سال ۱۸۳۴ آقای تیلوریه مخترع فرانسوی یک دستگاه فلزی ساخت که نوعی استفاده از لوله فاراده<sup>۱</sup> بود و وی را قادر می‌ساخت که گاز کربنیک را با دانات ساده‌ای، مایع سازد و حتی با دانات دیگری آن را به جامد تبدیل کند (شکل ۴۱). هر چند که آزمایش تیلوریه کاربرد صنعتی نیافت و در زمره آزمایشهای تاریخی مربوط به مایع کردن گازهایی ثبت شد که در آن زمان به گازهای دائمی شهرت داشتند، این آزمایش شهرت بسیار یافت و بی‌شبهه در جهتگیری افکار صنعتگران به سوی کاربرد گازهای مایع شدنی برای ساخت ماشینهای یخساز مؤثر افتاده است. با این همه، نخستین کاربرد آمونیاک در آغاز بر پایه حلالیت زیاد این گاز در آب بوده است. پژوهشگران متعددی از اواخر سال ۱۸۵۰ در این باره اندیشیده‌اند و آقای کاره که این اصل را در سال ۱۸۵۹ به ثبت رسانید قطعاً نخستین کسی است که کار تحقیق را تا ساخت ماشینهای عملی به پیش برده است.

ماشینهای جذبی: این ماشینها را دستگاههای گرایشی یا جذبی نامیده‌اند. از یک دیگ محتوی محلول غلیظ آمونیاک و یک مایع‌کننده که یک مارپیچ غوطه‌ور در یک ظرف آب سرد بود، و بالاخره یک یخساز تشکیل می‌شدند. آمونیاک بین این قسمتها می‌گردید. گرم کردن بوسیله یک مارپیچ ایجاد تبخیر در دیگ و بالا رفتن فشار در بخشی از دستگاه می‌کرد. بخار در مایع‌کننده، مایع

۱. یا لوله میدان، یا لوله قوا، لوله‌ای است که از خطوط قوا تشکیل می‌شود. -م.

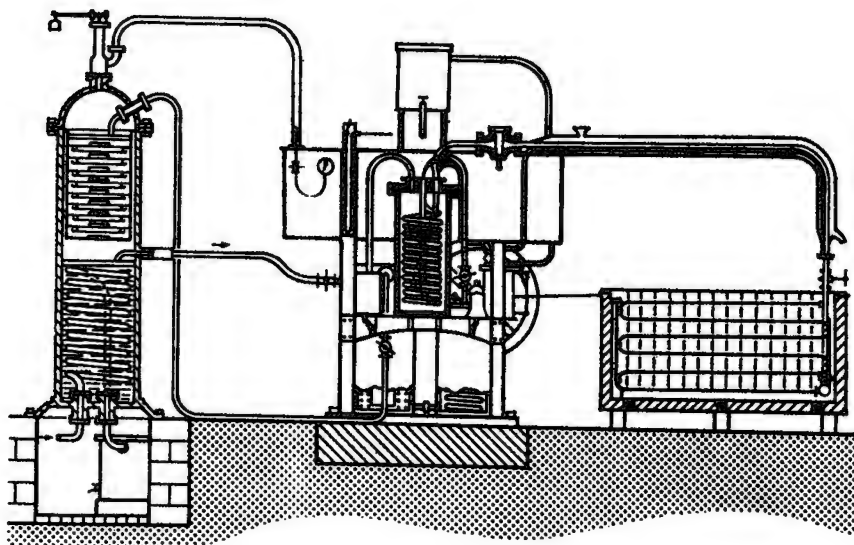


شکل ۴۱. ماشین تبلوریه برای مایع کردن گاز کربنیک.

سمت چپ، لوله فلزی که حول مرکز خود حرکت نوسانی دارد. این لوله، محتوی بیکربنات و ظرفی دارای اسید سولفوریک است. با نوسان دادن این لوله، اسید ظرف روی بیکربنات می‌ریزد و  $\text{CO}_2$  تحت فشار تولید می‌شود. با باز کردن شیرها، دتانت ایجاد می‌شود و ظرف سمت راست با  $\text{CO}_2$  مایع پر می‌شود.

می‌شد. مایع از ردیفی از لوله‌ها، که نقش تنظیم‌کننده و تبادلگر حرارتی را داشتند می‌گذشت تا به ماریچه‌های یخساز برسد و در آنجا بخار می‌شد. تغییر حالت، سبب سرد شدن آب‌نمک یا محلول کلرور کلسیم، می‌شد که ماریچه‌ها در آن غوطه‌ور بودند. در این ظرف، خانه‌هایی بود که کاسه‌های آب‌هایی که باید یخ زده می‌شدند در آن خانه‌ها گذاشته می‌شدند، و نیز لوله‌هایی که آب‌نمک سرد برای خنک‌کردن محلهایی که می‌خواهند سرد شود در آن جریان دارند. در پایان، گاز آمونیاک از راه تبادلگرهای حرارتی به بخش مرکزی ماشین باز خواهد گشت و در آنجا با مایع رقیق شده‌ای که از دیگ می‌آید برخورد خواهد کرد. آمونیاک در مایع حل می‌شود و محلول غلیظ شده، به دیگ، تلمبه خواهد شد.

این دستگاه پیچیده برای تأمین گردش پیوسته گاز و مایع بین بخشهای متعدد آن ساخته شده است. وانگهی، تأثیر تبادل حرارت در نقاط مختلف تأمین شده‌اند (شکل ۴۲). با این دستگاه می‌توان  $100^\circ$  کیلوگرم یخ در ساعت تهیه کرد. موفقیت ماشین کاره قطعاً مدیون سازندگان آن، آقایان مینیون و روار است که در زمان خود مالک بهترین کارگاههای ماشین‌سازی پاریس بودند. آقای فردینان کاره در همین زمان یک دستگاه یخساز خانگی ساخت که بر همان اساس

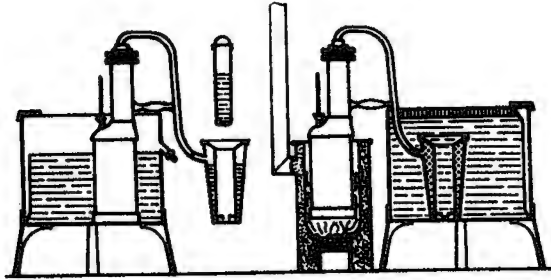


شکل ۴۲. ماشین یخساز فردینان کاره.

دیگ محتوی آمونیاک محلول است که هرگاه گرم شود بخار می‌گردد (سمت راست). آمونیاک در مخزن سرد، مایع می‌شود. زمانی که دیگ در ظرف خنک‌کننده قرار دارد (سمت چپ)، آمونیاک تبخیر می‌شود و در کاسه تولید یخ می‌کند و خودش در مایع دیگ از نو محلول می‌گردد.

ماشین یخساز، اما ساده‌تر، بود زیرا پیوسته کار نمی‌کرد (شکل ۴۳). این دستگاه دیگی داشت که کوره‌ای آن را گرم می‌کرد و محتوی آمونیاک محلول بود، و نیز یک ظرف گیرنده بخار که در طشتی پر از آب‌نمک قرار داشت. این ظرف مخروطی شکل بود و آبی که باید یخ می‌شد در آن ریخته بودند. آمونیاک، همین‌که با وارد شدن در ظرف گیرنده، مایع می‌شد، دستگاه برمی‌گردید، دیگ در طشت آب‌نمک، و یخساز بر تکیه‌گاه ساده‌ای قرار می‌گرفت. آمونیاک، بخار و از نو در آب سرد دیگ حل می‌شد. این تبخیر، دما را پایین می‌آورد و موجب می‌شد که در هر ساعت یک کیلوگرم یخ ساخته شود.

دستگاه‌های فردینان کاره که در سال ۱۸۶۲ در نمایشگاه لندن به نمایش گذاشته شدند، کنجکاو بسیاری را برانگیختند و صنعتگران دیگری از آنها تقلید کردند. آقای ادمون، برادر فردینان کاره، کمی بعد در ۱۸۶۶ آزمایش آقای جان لزلی را در سرد کردن نئهای یخ خانگی، مستقیماً



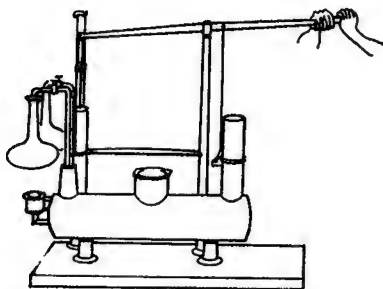
شکل ۴۳. یخساز خانگی فردینان کاره.

سمت راست، دیگ محتوی آمونیاک محلول، که هر زمان گرم شود، آمونیاک آن تبخیر می‌شود. آمونیاک در مخزن خنک، غلیظ می‌شود. زمانی که دیگ در طشت خنک‌کننده قرار دارد (سمت چپ) آمونیاک تبخیر می‌شود و آب موجود در کاسه‌ها یخ می‌بندند؛ بخار آمونیاک در مایع دیگ از نو حل می‌شود.

عملی کرد. این، نوع دستگاه کلاسیک برای نگهداری اسید سولفوریک و یک تلمبه کوچک خلأ بود که با دست عمل می‌کرد و تصویر آن در همه کتابهای فیزیکی دیده می‌شود. دسته این تلمبه یک همزن را به‌کار می‌انداخت و این همزن تماس اسید و بخارآبی را که در اثر کاهش فشار پدید آمده بود از نو برقرار می‌کرد. آبی که بخار تهیه می‌کرد و باید سرد می‌شد در تئگهایی، روی لوله‌های مکش گذاشته می‌شدند (شکل ۴۴). یخساز خانگی ساخت آقای ادمون کاره، به مدت چند سال در کافه‌هایی که ناگزیر از تهیه سریع یخ بدون هرگونه تأسیسات مکانیکی بودند رواج فراوان داشتند. این دستگاه همچنین در پیشرفت ذائقه مشتریان در مشروبات خنک مؤثر بود. آقای ادمون کاره به روشهای برادر خود که در اواخر سده نوزدهم، با وجود موفقیت‌های ماشینهای لینه، پیکت و عده دیگر، هنوز هم روش خود را دنبال می‌کرد، روی آورد.

شارل تلیه: کارهای آقای تلیه در برهه‌ای از ۱۸۶۳ - ۱۸۷۹ انجام گرفته‌اند. آقای تلیه پس از آزمایش اتر متیلیک که برای وی تلخکامی به‌بار آورد در سال ۱۸۶۷ نخستین ماشین کمپرسی خود را که آمونیاک مصرف می‌کرد، ساخت؛ آمونیاک بسیار بهتر از اتر عمل می‌کرد (شکل ۴۵). این ماشین را در شکلات‌سازی آقای ژول مینه در نوازیل نصب کرد. ساختمان آن همانند دیگر ماشینهای یخساز بود که بعداً ساخته شدند.

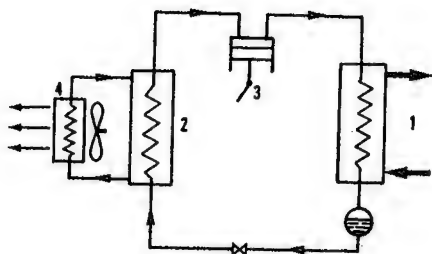
نام آقای شارل تلیه را هاله‌ای از افسانه دربر گرفته است که در آغاز سده بیستم می‌خواستند به وی لقب «پدر» سرمازایی اعطا کنند. وی مانند بعضی از معاصران خود، از قبیل برژس یا آده در



شکل ۴۴. ماشین یخساز تنگی ادمون کاره.

ظرف افقی محتوی اسید سولفوریک است. سمت چپ، تلمبه بادی عمودی، سمت راست، دسته‌ای که همزن داخلی را فعال می‌سازد.

فرانسه دارای مغزی عمدتاً تخیلی بود تا ابداع‌کننده. وی که در همه چیز کنجکاو بود با هر چیزی ور می‌رفت. به علت کمی اطلاعاتش در مسائل اساسی و عدم تواناییش در صنعتگری از یک شکست به شکست دیگری می‌رسید. وی بذر چند اندیشه را پاشید: خنکسازی چند مرحله‌ای که بعدها از آن برای مایع کردن گازهای دائم استفاده شد؛ پراتیک نگهداری در انبار و حمل در کشتیهای سردخانه‌دار. اما تلیه نتوانست از این ابتکارها، سودی بگیرد. اندیشه‌های وی در آن زمان از سوی صنعتگران دیگری به عمل درآمدند، اما حق وی را فراموش



شکل ۴۵. اصول ماشین یخساز تلیه.

کمپرسور ۳ گردش آمونیاک را بین کندانسور ۱ و تبخیرکننده ۲ تأمین می‌کند. آب‌نمکی که در ۲ سرد شده است در خنک‌کننده هوا ۴ گردش دارد. دستگاه هوای سرد شده را در لوله‌های محوطه‌ای که باید خنک شود، به‌طور ضربانی می‌دمد.

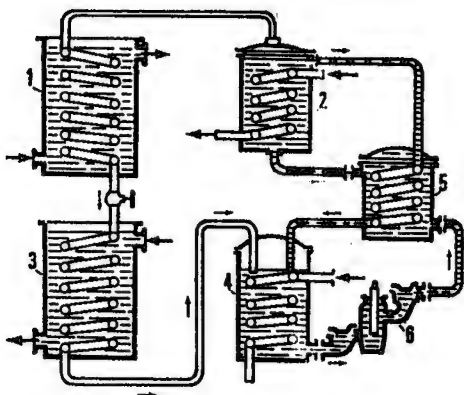
کردند، هم‌چنانکه او فراموش کرده بود که کاره کاربرد آمونیاک را ده سال پیش از وی به ثبت رسانیده است و بدین علت گرفتاریهای قضائی برای وی پیش آمد و در نتیجه او چهرهٔ کسی را یافت که قربانی دسایس کثیفی شده است. تنها نوآوری واقعی وی مربوط به واژهٔ *frigorifique* (≈ سرمازای) است، نامی که در سال ۱۸۷۶ برای دومین کشتی سردخانه‌دار خود، که مخصوص حمل گوشت از آرژانتین به اروپا بود، برگزید.

مطلبی که باید گفته شود این است که در این زمینه وی یک نوآور بود، گرچه کشتی وی پس از مدت کوتاهی از ردیف کشتیهای بازرگانی حذف شد. در عصر وی هیچ چیز برای حمل گوشتها و غذاهای گیاهی یخی یا سرد شدهٔ استرالیا، اوروگه، آرژانتین، نیوزیلند در حدود سال ۱۸۸۰ وجود نداشت، اما حدود بیست سال بعد، این رشته چنان توسعه یافته بود که تعادل منابع کشورهای صادرکننده و ذخایر کشورهای اروپایی، بویژه انگلستان تغییر کرده بود.

در همان دوران قطارهای سردخانه‌داری که روی خط آهن حرکت می‌کردند نیز گام‌های اولیهٔ خود را، بویژه در ممالک متحدۀ آمریکا، که خطوط آهن نقاط دور را به هم متصل می‌ساخت، به پیش برداشتند.

ماشینهای لینده و پیکت: در آستانهٔ سال ۱۸۸۰، ساخت ماشینهای سرمازای و کاربرد آنها، دیگر یک صنعت مهم به‌شمار می‌آمد. پایان این نوآوری با رواج ماشینهای کمپرسی مشخص می‌شود که طی بیست سال ماشینهای دیگر را از میدان به‌در کرد. این موفقیت بویژه مرهون آقای کارل فون لینده، مهندس آلمانی و راوول پیکت فیزیکیدان سوئسی است. برخلاف تلیه که به همه کار می‌پرداخت و معاصرانش او را نادیده گرفتند، آقایان لینده و پیکت توانستند مشخصات وسایل خود را در سایهٔ اطلاعات ترمودینامیکی حساب کنند. لینده نخستین کسی بود که نظریهٔ ماشین سرمازای کمپرسی را با بررسی رفتار گازهای مختلف در دسترس تنظیم کرد و گاز آمونیاک را برگزید. وی در اصلی که تلیه پایهٔ کار خود قرار داده بود هیچ تغییری نداد. این چرخه دارای سه مرحلهٔ زیر بود: فشرده‌سازی گاز با فشاری که در مورد آمونیاک در حدود ۱۵ اتمسفر بود؛ سرد کردن و میعان گاز فشرده شده؛ دانات همراه با تولید سرما.

هرچند که ترمودینامیک در آن زمان بتازگی از مرحلهٔ یک نظریهٔ ریاضی بیرون آمده بود و هنوز هیچ کمکی به پژوهشهای تکنیکی نمی‌توانست بکند، لینده متوجه شد که چرخه یک ماشین سرمازای مشابه چرخه یک ماشین محرکهٔ بخاری است و به یک رشتهٔ کارهایی دست زد که ظاهراً فراتر از ساخت نخستین مدل ماشین وی در سال ۱۸۷۵ بود و این کارها را با همکاری مهندسان



شکل ۴۶. ماشین سرمازا با جذب گاز.

کندانسور ۱ گازی را که در دیگ ۲ از محلول خود تبخیر شده است دریافت می‌کند. گاز در کندانسور که با آب خنک می‌شود، مایع می‌شود. این مایع در خنک‌کننده ۳ تبخیر می‌شود و آب‌نمک را که حامل سرما می‌باشد خنک می‌سازد، آنگاه به سوی ظرف ۴ هدایت می‌شود تا در آنجا محلول گردد. محلول فقیر دیگ ۲ از تبدیلگر ۵ می‌گذرد. تلمبه ۶ گردش را در ۲، ماریج بخار آب، در ظرف ۴ و بالاخره ماریج آب سرد تأمین می‌کند.

متعددی ادامه داد. گرچه ترمودینامیک برای پژوهش در کار موتورهای حرارتی پایه‌گذاری شده بود، ساختار آن، به‌عنوان یک دانش همگون، حدود نیم سده، در علوم مهندسی، هیچ کاربردی، جز سومین مرحله ماشینهای سرمازای نیافته بود.

گازهای سرمازایی که در سال ۱۸۷۵ به‌کار برده شد، آمونیاک بوسیله لینده و گاز سولفور بوسیله پیکت بود. بعدها، حدود ۱۸۸۹، ماشینهای با گاز کربنیک ساخته شدند که نخستین نمونه آن، کار وینتهازن بود. مواد سرمازای دیگری از قبیل کلرور متیل و مخلوطهای گاز سولفور و گاز کربنیک نیز، آزمایش شدند.

صرفنظر از نوع گازها، مدار آنها در همه انواع ماشینها یکی بود. در حالت گازی سردکننده در کمپرسور جذب می‌شدند و به حالت فشرده به سوی کندانسور (مایع‌کننده) رانده می‌شدند تا در آنجا خنک و مایع گردند. از آنجا به سردکننده روانه می‌شدند که در آنجا تبخیر آنها به سوی کمپرسور، موجب می‌شد مقداری از گرمای خود را به آب‌نمکی که ماریجها در آن بودند، واگذارند (شکل ۴۶).



طبعاً نوع این مدار بسیار گوناگون بود، و به گاز به کار رفته و محلولهایی که سازنده دستگاه برای حل مسائل جزئی بسیار برگزیده بود، بستگی داشت؛ وانگهی در جریان کار، هر کدام از آنها متحمل اصلاحات متعددی شدند.

در ماشین لینده، کمپرسور، نخست حالت ایستاده داشت، اما پس از اندک مدتی آن را افقی کار گذاشتند و حالت افقی برای همه ماشینهای سرمازای عمومیت یافت، جز اینکه در کشتیها و واگنها گاهی از کمپرسورهای ایستاده استفاده می شد. آقای لینده در سال ۱۸۸۹ ماشین ساخت که فشار در دو طبقه عملی می شد. کمپرسور نخستین، فشار گاز آمونیاک را به حدود هشت اتمسفر می رسانید و دومی این فشار را تا پانزده یا شانزده اتمسفر بالا می برد. آقای لینده در سیلندر کمپرسور قطراتی از آمونیاک مایع تزریق می کرد که تبخیر آنها به طور مؤثری، گرمای ایجاد شده را جبران می کرد. کمپرسور ماشینهای پیکت را یک پوشش آبی دور سیلندر، خنک می ساخت و داخل خود پیستون آب گردش داشت. همین وسایل روی ماشینهای گاز کربنیک نیز به کار گرفته می شد. زمانی که گاز سولفور به کار می بردند فشار ایجاد شده بسیار کمتر از آمونیاک، و در حدود سه اتمسفر بود. ماشینهایی که از گاز سولفور استفاده می کردند در کمتر از  $10^{\circ}\text{C}$  - کار نمی کردند، دمایی که برای ساختن یک مایع کافی بود ولی برای خنک کردن سردخانه ها ناکافی، در هر دو مورد کمپرسورها از نوع رفت و برگشتی بودند و آنها را طوری طراحی کرده بودند که فضای غیر قابل استفاده بین سر پیستون و کف سیلندر، حداقل باشد.

ماشین گاز کربنیک: ماشین آقای وستینگهاوس که گاز کربنیک بود در سال ۱۸۸۹ ساخته شد. این ماشین گویا با فشار ۷۰ اتمسفر کار می کرد - فشاری که دشواریهای گوناگونی، هم در ساخت کمپرسور و هم در نشتی شدن آن، پدید می آورد. این فشار در دو یا سه طبقه ایجاد می شد. بعضی کمپرسورها ایستاده گذاشته می شدند و محتوی آب گلیسرین دار بودند که نقش پیستون مایع را داشت. از گلیسرین همچنین بدین منظور و به منظور لیزانه در ماشینهای کلور متیل استفاده می شد. در سال ۱۸۸۹ چند دستگاه از این ماشینها در فرانسه ساخته شدند.

در قسمتهای دیگر این ماشین نیز، سردکننده و کندانسور، چنین تفاوتهایی دیده می شد. این قسمتها اساساً یا از مارپیچها، یا یک ردیف لوله های عمودی یا مایل تشکیل می شدند که به کلکتور (گردآور) های بالایی و پایینی لحیم بودند. محلولهایی که برای قسمتهای مختلف به کار گرفته شدند به اندازه انواع گوناگون سردکننده ها، متنوع بودند. هر سازنده، بدون اینکه در اصول ساخت خود نوآوری جدی داشته باشد، یک نوع سردکننده می ساخت.

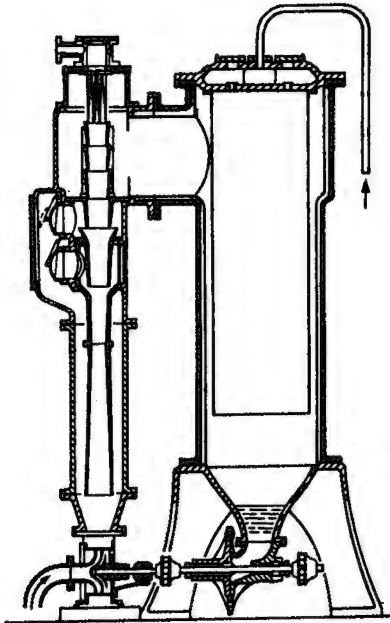
پیشرفت تکنیک سرمازایی: در سالهای نخستین سده بیستم، ساخت ماشینهای سرمازای، تکنیکی کاملاً جا افتاده داشت. ترمودینامیک در امر تعیین کاربرد گازها، ایجاد مدل‌های تازه کمپرسور، کندانسور، سردکننده‌ها، راهنما شده بود. هر کدام از این قسمت‌ها به‌طور جداگانه در کتابهای فنی، بررسی شده‌اند و نیازی به شرح کلی مدل‌های ساخت هر شرکت نیست.

تکنیک سرمازایی زائیده یک جریان فکری و صنعتی برخاسته از چند آزمایش چشمگیر آزمایشگاهی بود. این جریان تا آغاز سالهای ۱۸۸۰ هنوز کاملاً شکوفا نشده بود زیرا در همه کشورها، کارگاههای مشهور مکانیکی در کار ساخت موتورهای مشابهی بودند. همگی آنها در ساخت ماشینهای بخار، تلمبه‌ها و توربینها تجربه بزرگی به‌دست آورده بودند. چنین می‌نماید که مشکلات این وسایل در همه جا به آسانی رفع شدند.

آقای لینده شرکت خود را در ویسبادن، و شعبه‌ای از آن را در انگلستان تأسیس کرد. تأسیسات کل در فرانسه و زولتسر در سویس حق استفاده از امتیازهای وی را به‌دست آوردند. ماشینهای لینده، خیلی مانده بود که در جهان رواج یابند. پیکت که شرکت ماشین‌سازی ژنو را داشت، ماشین خود را می‌ساخت. ماشینهای گاز کربنیک را در آلمان، وینتاوزن و در انگلستان، هال می‌ساخت. کارگاههای متعدد دیگری نیز بنوبه خود برای تصاحب بازار تازه کوشیدند، اما هیچیک از دستاوردهای ۲۵ ساله فراتر نرفتند.

ماشین لوبلان - وستینگهاوس: با این‌همه، سیستمهای دیگری مورد بررسی قرار گرفتند. سیستمی که بیش از بقیه از روشهای کلاسیکی فشرده‌سازی گازهای مایع شونده دور می‌شد، کمی پیش از سال ۱۹۱۰ به بازار آمد. این سیستم که پیشنهادی آقای موریس لوبلان و ساخت وستینگهاوس بود از تبخیر آب استفاده می‌کرد (شکل ۴۷). در این سیستم که کاملاً اصیل بود از آزمایش قدیم آقای لرلی که آقای ادمون کاره کوشیده بود آن را عملی سازد، استفاده می‌شد.

اما در این سیستم از کاربرد اسید سولفوریک برای جذب بخار آب، در ماشینی که به قصد کار کردن در مقیاس صنعتی ساخته می‌شد، صرف‌نظر نشده بود. به همین دلیل تلمبه‌های پیستونی اجازه تبخیر و جذب سریع بخار آب را نمی‌دادند. به علت کشش بسیار ضعیف بخار آب در دمای صفر و پایینتر از آن، باید در ماشین، فشارهایی در حدود چند میلیمتر جیوه (در دمای  $10^{\circ}\text{C}$  - فشار ۲ میلیمتر) حفظ شود. راه‌حلی که مخترعان برای ایجاد خلأ اندیشیده بودند، به کارگیری تلمبه‌ای بود که بخار آب را از بالا به پایین یکی از بخشهای عمودی ماشین، کندانسور می‌راند. این تلمبه که چیزی جز یک انژکتور آقای پل ژیفار که روی لوکوموتیوها نصب می‌شد نبود، بخار آب آب‌نمک



شکل ۴۷. ماشین سرمازای لوبلان - وستینگهاوس.

ستون سمت راست، آب‌نمک همراه با آب‌نمکهایی که از لوله‌های سمت راست وارد شده است. ستون سمت چپ، تلمبه مکشی بخار آب از آب‌نمک با تجهیزات همگرا - و اگر از بالا به پایین. در پایین، تجهیزات توربینی که با بخار آبی که از یک تلمبه پاشنده و یک مجرای خروجی می‌آید فعال می‌شود، و نیز در سمت راست، تلمبه جریان دهنده آب‌نمک سرد شده دیده می‌شود.

محتوی در بخش دوم عمودی، محفظه تبخیر، را با خود می‌برد. وانگهی، یک توربین بخار برای به‌کار انداختن تلمبه گردش آب‌نمک و یک توربین آبی که تخلیه آب کندانسور را تأمین می‌کرد، این ماشین را فعال می‌ساختند. بخار آب که در توربین موتور عمل کرده است به بخش بالایی کندانسور هدایت می‌شد تا کار تلمبه بخار آبی تأمین شود. ماشین وستینگهاوس - لوبلان در سایه تعدادی از این مشخصات، مرحله تازه‌ای را در کار پژوهش فنی مربوط به سرما سازی گشوده است.

کاربرد سرمای مصنوعی: سرمای مصنوعی از سالهای ۱۸۶۰ در نگهداری و حمل خوراکیها بسرعت کاربرد فراوان یافت. سرمای ویژه این کار، ملازم دستکاریهایی بود که برای تأمین سرمای مناسب و کافی باید رعایت می‌شدند، بویژه زمانی که مسئله نگهداری از قطعات بزرگ گوشت

مطرح بود و خطر تراکم رطوبت، که گوشت را بسرعت فاسد می‌کرد. در سال ۱۸۸۶ آقای ف. ه. پوئتش<sup>۱</sup> مهندس آلمانی برای منجمد کردن لایه‌های مرطوب و حرکت‌کننده خاک که چاه معدن در آنها حفر می‌شد از یک ماشین سرمازا استفاده کرد. سرانجام، علاوه بر آبجوسازی، شکلات‌سازی، لبنیات، رشته‌های گوناگونی از شیمی صنعتی از سرمای مصنوعی به عنوان عامل مناسبی برای تهیه و استخراج فراورده‌های گوناگون استفاده می‌کردند.

### مایع کردن گازهای دائمی

شیمی صنعتی در این مورد از طریق تکنیکهای تولید سرما مستقیماً سهیم است؛ تکامل منطقی این تکنیکها در اواخر سده نوزدهم، به پیدایش یک روش تولید صنعتی فراورده‌های گازی انجامید که تا آن زمان به مقدار کم با وسایل شیمیایی ساخته می‌شدند یا اینکه اساساً ساخته نمی‌شدند. این فراورده‌ها اساساً عناصر مشکله هوا، اکسیژن و نیتروژن و بعدها، گازهای کمیاب هستند که بعضی از آنها در ساختن لامپهای برق به‌کار رفتند، و سرانجام هیدروژنی است که با تقطیر جزء به جزء گاز آب به‌دست می‌آمد.

گازهای دائم: مایع کردن گازهای به اصطلاح دائم در مقیاس صنعتی زمانی مورد بحث قرار گرفت که آزمایشهای تامس اندروز، لویی کاپوت<sup>۲</sup>، پیکت، اولس زفسکی<sup>۳</sup>، و دروبلفسکی<sup>۴</sup> نشان دادند که دائمی بودن این گازها، تنها معلول نارسا بودن وسایلی است که در آن زمان برای مایع کردن آنها به‌کار می‌رفتند.

پس از تجربیات فاراده در ۱۸۴۵ و نیز آزمایشهایی که فیزیکدانان متعددی انجام دادند، معلوم شد که شش گاز در برابر همه آزمایشهای مایع کردن، دمای پایین ( $-10^{\circ}\text{C}$ )، که با کمک مخلوط یخ خشک و اتر به‌دست می‌آمد و فشار حدود  $50^{\circ}$  اتمسفر، می‌توانند پایدار باشند. این گازها عبارتند از: اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن، دیوکسید نیتروژن، اکسید کربن و متان.

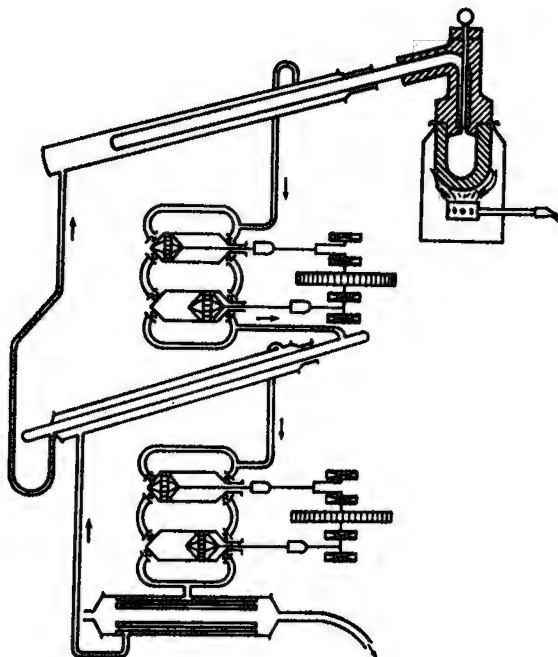
این مسئله کنجکاوی فیزیکدانان همه کشورها را برانگیخت و از سال ۱۸۶۳ تا اواخر سده، یک سلسله از آزمایشها، حل مسائل نظری و عملی مایع کردن همه گازها را ممکن ساختند. در مدت سی سال تنها پژوهشهای آزمایشگاهی مربوط به تغییر حالت گازها بر حسب دما و فشار ادامه داشت.

در سال ۱۸۶۳ آقای تامس اندروز، فیزیکدان بریتانیایی آزمایشهای فاراده را، باز با توفیق جزیی از سرگرفت؛ اما زمانی که با گاز کربنیک کار می‌کرد نقطه بحرانی را کشف کرد - دمایی که

در بالاتر از آن فشار هر قدر هم زیاد باشد گاز به مایع تبدیل نمی‌شود. وی این پدیده را با رسم منحنیهای همدمای (ایزوترمیک) فشار بیان داشت. نقطه بحرانی گاز کربنیک ( $30.9^{\circ}\text{C}$ ) درجه است. گفت‌وگوهای مربوط به این آزمایشها این اندیشه را پیش آورد که همه گازها، حتی گازهای دائمی، یک نقطه بحرانی دارند و بنابراین در صورتی مایع می‌شوند که در زیر نقطه بحرانی خود باشند، یعنی در دمایی احتمالاً بسیار پایین، که در آزمایشهای آن زمان، دسترسی بدان نداشتند. موفقیت در آزمایشگاه: آقایان لویی کاپوت، و راثول پیکت هر یک مستقلاً اما تقریباً در یک زمان، در پایان ۱۸۶۷ توانستند گازهای دائمی را مایع کنند؛ روشی که این دو فیزیکدان به‌کار برده بودند بسیار متفاوت بود. دستگاه کاپوت که در همه کتابهای فیزیکی تصویر شده است یک ماشین دستی است که حجم بسیار کمی از گاز را در لوله بسیار باریکی که روی حمام جیوه‌ای گذاشته شده است فشرده می‌سازد. انبساط ناگهانی چنان سرمایی ایجاد می‌کند که مهی از مایع لوله آزمایش را کدر می‌سازد.

پیکت برای نخستین بار از روش خنکسازی تدریجی، که تلیه اصول آن را در کتاب خود در سال ۱۸۶۷ با عنوان *L'ammoniaque dans l'industrie* بیان کرده بود استفاده کرد، وسیله آزمایشی وی عبارت بود از یک ظرف در بسته فلزی که گاز مورد مطالعه، با واکنش شیمیایی: گرم کردن کلرات پتاسیم برای تهیه اکسیژن، تجزیه فورمات پتاسیم بوسیله پتاس برای تهیه هیدروژن، در آن تولید می‌شد (شکل ۴۸). ظرف در بسته واکنش، به لوله طویلی متصل است که رو به پایین از یک خنک‌کننده عبور می‌کند. پیکت بدین ترتیب، مانند مورد لوله فاراده، تأثیر فشاری را که در دستگاه با آزاد شدن گازها در اثر واکنش شیمیایی ایجاد می‌شد با خنک کردن از بیرون بوسیله لوله خنک‌کننده، خنثی می‌کرد.

این سیستم خنکسازی بدیع بود و سرانجام هم آقای پیکت الهام‌بخش سازندگان ماشینهای سردکننده صنعتی شد. خنک‌کننده‌ای که لوله واکنش را در میان گرفته بود جریانی از گاز کربنیک مایع را از خود عبور می‌داد و تبخیر پیوسته گاز کربنیک را، مکش تلمبه‌ای که با کمپرسور جفت شده بود تضمین می‌کرد. بدین ترتیب، گاز کربنیک از نو در لوله‌ای که دور آن را ماده خنک‌کننده قویتری گرفته بود مایع می‌شد. ماده خنک‌کننده اخیر به همان روش اما با جریانی از گاز سولفور و مایع تهیه می‌شد. هر دو جسم پس از مایع شدن به نخستین خنک‌کننده‌های خود باز می‌گشتند و چرخه تکرار می‌شد. آقای پیکت محققاً با آگاهی گاز سولفور را به جای آمونیاک به‌کار برده بود، زیرا وی دو سال بود که در ماشینهای سرمازای خود از آن استفاده می‌کرد زیرا هم آسان به‌دست



شکل ۴۸. دستگاه آزمایشی پیکت برای مایع کردن اکسیژن.

بالا سمت راست، ظرف در بسته تهیه گازها، که در لوله سمت چپ خنک شده است به شکل فشرده جمع می‌شوند و  $\text{CO}_2$  مایع، که زوج تلمبه-کمپرسور، چرخه آن را از زیر دستگاه می‌گذرانند. در دومین خنک‌کننده،  $\text{SO}_2$  مایع، خنک می‌شود.

می‌آید و هم با آن مائوس شده بود.

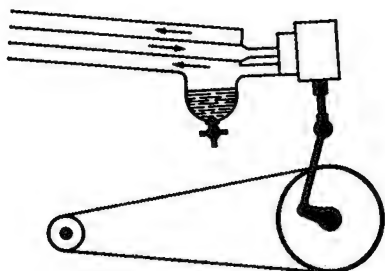
این روش بسیار عالی و هوشمندانه بود. این فیزیکدان نتوانسته بود حالت سیال را در داخل ظرف واکنش ببیند - کاری که کاپوت در لوله دستگاه خود انجام داده بود. پیکت درحالی‌که با توبی ظرف واکنش مانور می‌کرد، متوجه نوعی جهش سیال شد و آن را اکسیژن یا هیدروژن مایع و حتی گویا جامد معرفی کرد. وی بعدها به اشتباه خود، لااقل در مورد هیدروژن بودن سیال، اعتراف کرد. نقطه بحرانی این گاز پایینتر از  $200^\circ\text{C}$  - است و دماهایی که پیکت به دست آورده بود بین  $130^\circ\text{C}$  تا  $140^\circ\text{C}$  - بود.

مایع کردن و تکنیکهای سرمازایی: نتایج کارهای کاپوت و پیکت در زمان خود، اندیشه‌های علمی را به هیجان آوردند، اما ضمناً این نظرات بدبینانه بودند زیرا مدت مشاهده مایعات، کوتاه بود و این اجسام نمی‌توانستند در این مدت کم بررسی شده باشند. طبعاً آنها انگیزه ردیفی از تحقیقات شدند که در این فاز، در سال ۱۸۹۸ با مایع کردن مقدار قابل توجهی هیدروژن به پایان رسید. نخست دو فیزیکدان لهستانی با نامهای وروبلفسکی و اولس زفسکی، همراه یکدیگر، یا مستقلاً تجربیات کاپوت را، با تغییر دادن شرایط و به‌کار گرفتن اتیلن مایع به‌عنوان سردکننده، ادامه دادند. آنان بدین ترتیب نیتروژن، اکسیژن و اکسید کربن را در برهه ۱۸۸۳ تا ۱۸۸۵ مایع کردند. کاپوت در همان زمان از روش سرد کردن پلکانی با اتیلن و متان استفاده کرد و همان نتایج را به‌دست آورد. سرانجام آقای جیمز دیوئر از سال ۱۸۸۴ به یک رشته کارهایی دست زد که تکرار یا تکمیل کارهای پیشینیان بود اما موفق به مایع کردن مقدار قابل توجهی هوا در سال ۱۸۹۵ شد. همه می‌دانند که دیوئر همچنین نخستین ظرفی را طرح کرد که مایعات جوشان را در دماهای بالا نگاه می‌دارد.

گرچه این سیاهه طویل کارها، بانی شاخه تازه‌ای از فیزیک شد که بی‌درنگ دانشمندان متعددی، بویژه آقایان کامرلینگ-اونس هلندی آن را گسترده ساختند. هیچ‌یک از این دو دانشمند امکان کاربرد صنعتی تکنیکهای سرمازایی را در سر نداشتند.

دشواریهای فنی: اصول این ماشینها که از سال ۱۸۹۵ برای مایع کردن هوا در اندازه‌های صنعتی به‌کارگرفته شدند در سال ۱۸۵۷ بوسیلهٔ زیمنس مشخص شد (شکل ۴۹). این ماشین باید انگیزهٔ دتانت هوای فشرده در یک موتور هوایی باشد. هوای انبساط یافته برای خنک کردن تدریجی انجام می‌گیرد زیرا تبادل گرما بین هوای ورودی و هوای خروجی، خنک شدن پیوستهٔ هوای ورودی را در پی دارد. این سیستم این مزیت را داشت که مانند روش تدریجی تلیه به مکانیسم پیچیده‌ای نیاز نداشت و تنها، وسیله ساده‌ای برای اجرای آن کافی بود. این روشها به موانع زیادی برخورد کردند که تا مدت‌ها باقی ماندند.

نخست مسألهٔ انزوای حرارتی بود که در آغاز این دوره بتازگی با آن برخورد کرده بودند. سپس پراتیک سرمای صنعتی که در سالهای ۱۸۶۰ - ۱۸۷۰ کاربرد چوب‌پنبه و کپسولهای دارای عایق گرمایی را زیاد کردند. موانع دیگر بدین علت برطرف نشدند که پایین آوردن دما به‌طور تدریجی، بیش از مایع کردن هوا، سبب مایع کردن و یخ زدن ناخالصیهای هوا، بویژه آب و اسید کربنیک می‌شود و لوله‌ها را می‌بندند. وانگهی کار کردن با وسایل مکانیکی به‌علت یخ زدن لیزانه‌ها، بیش از پیش دشوار می‌شود.



شکل ۴۹. تبادلگر حرارتی با تولید کار.

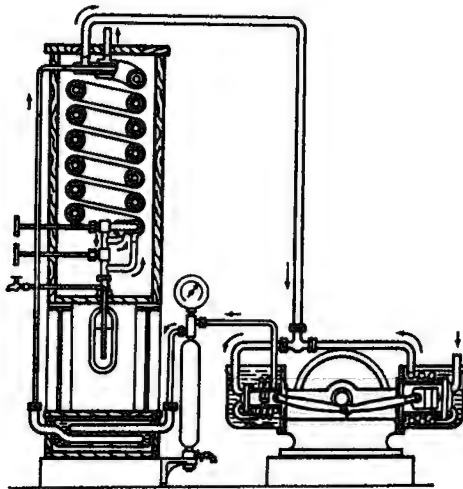
هوای فشرده به درون موتور می‌رود و در آنجا در لوله داخلی، دتانت می‌یابد. هوایی که انبساط یافته است، در حال فرار از لوله‌های محیطی، آن را خنک می‌کند.

آقایان لینده، همپسون<sup>۱</sup>، تریپلر<sup>۲</sup> که به غیرعملی بودن روش مخترعان متعدد متقاعد شده بودند به روشی از دتانت روی آوردند که بدون کار خارجی بود و آن اقتباس از آزمایشی بود که بسیار پیشتر از آنها توسط آقایان تامس و ژول انجام گرفته بود و طبق آن در جریان چنین دتانتی، دما تا اندازه‌ای - متناسب با افت فشار - پایین می‌آید، و این به علت پیروی نکردن گازها از قانون ماریوت - گی - لوساک است. مقدار خنک شدن در دماهای پایین، مطابق فرمولی که تامس و ژول داده بودند، زیادتر است. بنابراین، روش مبتنی بر تبادل گرما که زیمنس آن را پیشنهاد کرده بود می‌توانست در شرایط حذف موتور هوایی و تعویض آن با منفذی دارای شیر، به دماهای بسیار پایینتری راه یابد. خالص کردن هوا، مسأله‌ای بود که حل آن در این دوران دشوار نبود.

دتانت بدون کار خارجی: اصلاح ماشینهای صنعتی چند سال، از ۱۸۹۵ تا ۱۹۰۰ وقت گرفت. لینده نخستین کسی بود که این کار را انجام داد و او بود که به این صنعت بزرگترین تکانها را داد. وی حدود میانه ۱۸۹۵ در مونیخ ماشینی را به نمایش گذارد که ظرفیت یخسازی آن از نیاز یک آزمایشگاه افزون نبود، اما پیش‌نمونه ماشینهای بعدی شد.

اصول این ماشین، کاهش فشار هوا از ۲۰۰ به ۴۰ اتمسفر در مجرای داخلی یک ماریپج سه‌گانه هم‌مرکز است (شکل ۵۰). هوایی که دتانت یافته است، از بخش میانی ماریپج، برای سرد کردن هوای ورودی، بالا می‌رود. مایع با فشار معمولی در ظرفی که در پایین ماریپج قرار دارد جمع می‌شود و در آنجا نوعی غلیان جزئی ایجاد می‌شود. این بخش هوای سرد شده تا  $140^{\circ}\text{C}$  - بنوبه خود، بخش بیرونی ماریپج را طی می‌کند. بازایی سرما، بدین ترتیب بسیار پیشرفته است.



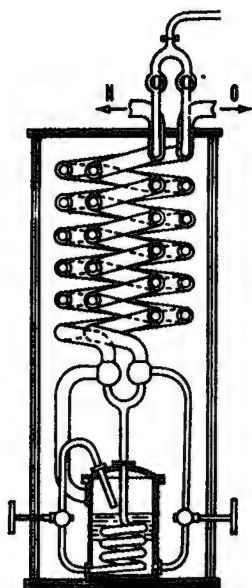


شکل ۵۰. نخستین نوع ماشین لینده برای مایع کردن هوا.

پایین، سمت راست، کمپرسور هوا با فشار  $4^{\circ}$  اتمسفر در سیلندر سمت راست و  $2^{\circ}$  اتمسفر در سیلندر سمت چپ. هوای فشرده به طرف مرکز در یک بطری سرریزکننده آب و سپس به طرف ماریپیج که در یک خنک‌کننده قرار دارد رانده می‌شود. این هوا بوسیله مجرای سمت چپ به بالای ستون برده می‌شود و از راه مجرای مرکزی ماریپیج ستون پایین می‌آید و فشارش تا  $4^{\circ}$  اتمسفر کم می‌شود. آن‌گاه در ماریپیج خارجی صعود می‌کند و کمپرسور از نو آن را وارد چرخه می‌کند. هوای مایع شده پس از چند بار گردش، شروع به جمع شدن در طرف زیر ماریپیج می‌کند. تبخیر جزئی آن در  $14^{\circ}\text{C}$  - ماریپیج را از راه سومین مجرای خارجی، سرد می‌کند.

چون برای جبران مقدار هوای مایع شده، مقداری هوا به‌طور منظم وارد این چرخه می‌شود، از نظر مکانیکی بهتر است که فشار هوا، تا حد فشار متعارفی، پایین نیاید.

این نوع ماشینها، در سالهای بعد به‌کار گرفته شدند. این ماشینها  $5^{\circ}$  لیتر هوای مایع در هر ساعت تهیه می‌کردند و این توانایی، بعضی از آزمایشها را در کارخانه‌های شیمیایی، ممکن ساختند. آقای لینده در  $1900$  ماشین پیشرفته‌تری را به نمایش گذارد که یک دستگاه سردکننده آمونیاکی به آن افزوده شده بود تا هوا را پس از فشرده‌سازی، برای اینکه بازده مایع آن بالا رود، سرد کند. تبخیر جزء به جزء هوا: در این فاصله زمانی، مسأله صنعتی دیگری به آغاز راه حل خود رسید. بحث بر سر عملیاتی است که طبعاً باید پس از مایع کردن هوا انجام گیرد و آن جدا سازی عناصر



شکل ۵۱. ماشین لینده، برای تقطیر جزء به جزء هوای مایع.

هوای فشرده از بالای ستون از راه مجرای میانی دو ماریج پایین می‌آید؛ گازی که در مجراهای حلقه‌ای بالا می‌رود، آن را سرد می‌کند. هوا وارد ماریجی می‌شود که از ظرف پایینی هوای مایع می‌گذرد. بخشی از هوا که در ماریج مایع شده است از طریق لوله سمت چپ در ظرف می‌ریزد و بخشی که مایع نشده است نیتروژن است که همراه با نیتروژنی که در ظرف بوسیله بخش حلقه‌ای ماریج چپ، تبخیر شده است صعود می‌کند. اکسیژن، در بخش حلقه‌ای ماریج راست، تبخیر می‌شود.

مشکله آن: اکسیژن و نیتروژن است. آقای لینده در ۱۸۹۵ دستگاهی ساخت که اساس آن را دو ماریج دارای جریان مضاعف تشکیل می‌دادند که در آنها هوای فشرده شده‌ای که از پایین به بالا در لوله مرکزی هر ماریج جریان داشت با هوای غنی از نیتروژن، که جزء مایع نشده را در پایین دستگاه تشکیل می‌داد و از فضای حلقه‌ای یکی از ماریجها می‌گذشت تبادل گرما می‌کرد و هوای غنی از اکسیژن که بخش مایع را تشکیل می‌داد در فضای حلقه‌ای ماریج دوم تبخیر می‌شد (شکل ۵۱).

در واقع جدا کردن این دو جزء از یکدیگر چنان دشوار است که تنها با غنی کردنهای پیاپی جزءهای گوناگون تبخیر مایعها می‌توان آن را انجام داد. لینده از آغاز کار، مشکل را با هوشیاری

حل کرد. دستگاه کامل وی دارای واحدهای متعدد مایع کردن و تقطیری بود که طوری مرتبط با یکدیگر بودند که گازهای حتی المقدور غنی از اکسیژن یا نیتروژن به دست آیند.

کاربرد صنعتی این دو جسم ساده فوراً آشکار نشد. لاینده در آن سالها در این اندیشه بود که صنعت هوای مایع بخت چندانی ندارد. گرچه جدا کردن فیزیکی این دو جزء یک کاربرد نیم صنعتی و نیم علمی بود، اما سود اقتصادی چندانی نداشت. و باز می توان به یاد آورد که روش الکترولیز دقیقاً در همین زمان وسیله ای برای تولید اکسیژن و هیدروژن گازی شده بود. چنین می نمود که اکسیژن کاربرد زیادتری دارد، و در رشته های پزشکی، جوشکاری و کارهای گوناگون آزمایشگاهی و چند ماده شیمیایی از آن استفاده خواهد شد.

یکی از نخستین کاربردهای آن تهیه یک ماده منفجره بسیار قوی بود که با جذب شدن آن در زغال متخلخل چوب به دست می آمد. از این ماده برای نخستین بار در یکی از معادن آلمان و بویژه به هنگام سوراخ کردن تونل زیرمیلون استفاده شد. از آنجا که این ماده باید در زمان کاربرد ساخته شود، یکی از دستگاههای لاینده در هر کارگاه، چه در بریگ<sup>۱</sup> و چه در دومودوسولا<sup>۲</sup> وجود داشت. درباره نیتروژن باید گفت که برای جدا کردن اکسیژن از آن روشهای متعددی وجود داشت که از آن جمله تثبیت شیمیایی اکسیژن بود. نیتروژن به عنوان عنصر شیمیایی، هیچ کاربردی نداشت. حدود سال ۱۹۱۰ اندیشیدند که از آن برای باد کردن لاستیکهای اتومبیل استفاده کنند.

چند سال بعد وضع روبه تغییر گذاشت زیرا روشهای سنتز آمونیاک رواج یافته بود. پس از جنگ جهانی اول صنعت هوای مایع، گستره چشمگیری در برابر خود یافت. علاوه بر روش اولیه تقطیر جزء به جزء، تقطیرهای تکمیلی برای تهیه هر گاز به حالت خالص، بسیار تکمیل شده بودند. دتانت با کار خارجی: یک مهندس جوان فرانسوی از شرکت تامس - هوستن به نام ژورژ کلود در راه انداختن این صنعت سهم بسیار دارد. وی برای خود کارهایی را، تنها چند سال بعد از ساختن نخستین ماشین مایع کردن هوا، شروع کرد. کلود که مغزی نوآور داشت - که در موارد دیگری هم شاهد آن خواهیم بود - از همان سال ۱۸۹۸ کار دتانت هوای فشرده شده را با ایجاد کار خارجی همراه کرد. وی در این راه برخلاف اندیشه های مرسوم، عمل کرد و برای حذف موانع قانونمند بتهایی می کوشید.

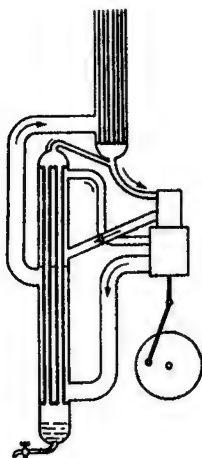
مانع عمده در برابر وی، علاوه بر خالص کردن هوا پس از فشرده کردن و پیش از انبساط آن برای پرهیز از انجماد گاز کربنیک یا آب موجود در دستگاهها، محال بودن آشکار روغنکاری کافی قطعات حرکت کننده موتور در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  - بود. آقای کلود که همراه آقای هس حمل و نقل

استیلن محلول در استون را همراه با فشار، طرح کرده بود در پی پایین آوردن هزینه تولید استیلن برای افزایش مصرف آن برآمد. به همین دلیل او اندیشید که در تولید کاربید (کربورکلسیم)، به جای گرمای برق، که در آن زمان گران بود از احتراق زغال در اکسیژن استفاده شود. ماشینهای لینده از اکسیژنی که از هوا گرفته می‌شد استفاده می‌کردند. این کوشش در زمینه کاربید دنبال نشد، اما ثمره آن، روشهای ژرژ کلود برای مایع کردن هوا و نوعی تقطیر جزء به جزء بود که شرکت هوای مایع Société de l'Air liquide که ترقی بسیار سریعی داشت، آنها را مورد استفاده قرار داد.

کلود با مراجعه به هسته تئوری زیمنس کوشید تا از این واقعیت که، محاسبه ترمودینامیکی ثابت می‌کند که بازده دتانت با کار خارجی بیشتر از بازده دتانت با جریان ساده است، استفاده کند. اندیشه بدیع وی، روغنکاری موتور بوسیله خود هوای مایع بود. اما در این صورت لازم بود که تا رسیدن به منطقه میعان، کار کردن موتور تأمین باشد. آقای کلود از اتر نفت، یعنی بنزین اتومبیل، برای راه انداختن در دوران کاهش دمای پیشین میعان، استفاده کرد. بعدها، وی اظهار داشته بود که هوای مایع برای روغنکاری کافی نیست در حالی که بنزین از این نظر کافی است.

اما وجود دشواریهای دیگر، وی را به ادامه پژوهش در حدود چهار سال دیگر، تا رسیدن به موفقیت‌های اولیه ناگزیر ساخت. دشواریهای کار، محدود به مواد و تجهیزات موجود در آن زمان نبودند، بلکه انحرافهایی که گازها در دماهای نزدیک به میعان آنها، نسبت به قوانین صرفاً نظری ماریوت و گیلوساک از خود بروز می‌دادند هم وجود داشت. سرانجام، کلود یک وسیله ابتکاری ساخت که به وی امکان می‌داد که بین قسمت تخلیه موتور و تبادُلگر گرمایی، یک «میعان‌کننده» بگذارد تا کار مایع کردن را در فشار و در دمای  $140^{\circ}\text{C}$  - به جای  $190^{\circ}\text{C}$  - انجام دهد. در سایه این تعبیه، موتور دتانت بسیار رضایتبخش‌تر کار می‌کرد، زیرا از هوای خنک شده  $100^{\circ}\text{C}$  درجه تغذیه می‌شد.

راه‌حلهای ژرژ کلود: همه آن چیزهایی که در رفتار ژرژ کلود غیرمنطقی می‌نمایند، منطقی هستند: دور شدن از دمای  $190^{\circ}\text{C}$  - که فشار و دتانت به‌طور نا به هنجاری مختل می‌شوند و کار مایع شدن در دمای نسبتاً بالا انجام می‌گیرد و برای جبران آن از فشار  $40$  اتمسفر استفاده می‌شود. در مایع‌کننده، در واقع، هوای فشرده‌ای که در خروجی تبادُلگر گرما برداشته شده است بوسیله هوای دتانت یافته رانده از موتور، مایع می‌شود. علاوه بر اینکه بازده نظری عملیات بهتر از بازده روش لینده است، فشار اولیه  $40$  اتمسفر به جای  $200$  اتمسفر در روش لینده وارد می‌شود. دمای کار موتور، کمتر بالاست و جلوگیری از اتلاف گرما دشواری کمتری دارد.



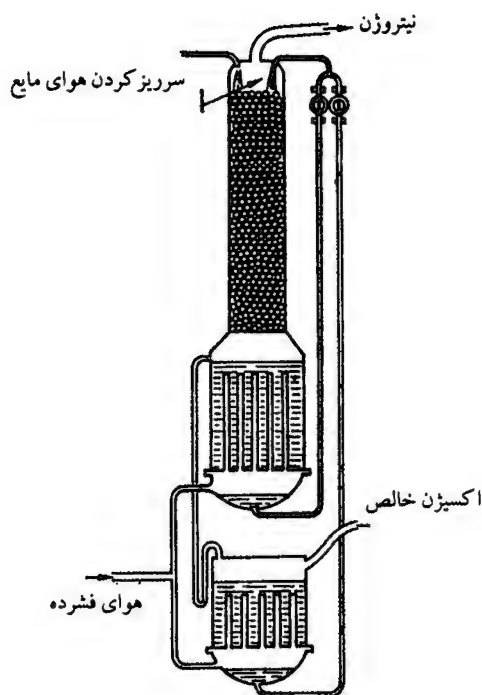
شکل ۵۲. دستگاه دو دتانتی کلود برای مایع کردن هوا.

سمت راست، ماشینی با دو سیلندر. هوای سرد شده بوسیله یک تبادُلگر، طبق نمای شکل ۴۸، وارد سیلندر کوچک می‌شود. این هوا که نخستین دتانت را تحمل می‌کند از درون یک دسته لوله می‌گذرد و نخستین میعان پدید می‌آید. در سیلندر بزرگ نیز همین عملیات انجام می‌شود و دتانت دوم پیش می‌آید و در بخش پایینی دسته لوله‌ها، میعان دوم عملی می‌شود.

روش کلود از همان سال ۱۹۰۶ همراه با وسیله‌ای برای مایع کردن با دتانت مضاعف، مورد استفاده قرار گرفت که باعث بهتر شدن شرایط کار این ماشین می‌شد (شکل ۵۲).

در سالهای بعد، آقایان کلود و لینده، هر دو برای بهتر کردن روشهای تبخیر جزء به جزء و تقطیر دوباره دو جزء متشکله به طور جدا از هم به دلایلی که گفته آمد، کوشیدند. لینده در سال ۱۹۰۲ دستگاهی را به راه انداخت که به وی امکان می‌داد اکسیژن خالص به دست آورد (شکل ۵۳). کمی بعد ژرژ کلود یک وسیله تبخیر و تقطیر دوباره طرح کرد که همزمان، نیتروژن و اکسیژن خالص تهیه می‌کرد (شکل ۵۴). فیزیکدانان دیگری و از آن میان آقای پیکت در همان زمان برای همین مسأله راه‌های دیگری اندیشیدند که از راه حل لینده زیاد دور نبود، اما آقایان پیکت و کلود بودند که نوآوران عمده‌ای در این تکنیکها به شمار می‌آیند.

تسخیر تکنیک سرمای صنعتی برای گشایش فاز تازه تحول شیمی صنعتی، یک عامل اساسی بود. این مطلب بعدها بازگو خواهد شد.

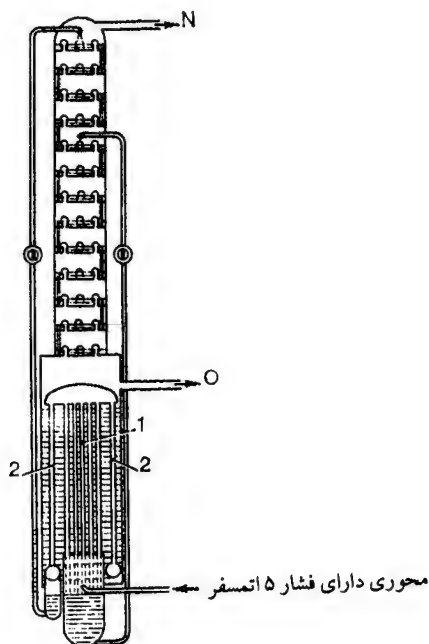


شکل ۵۳. دستگاه لاینده برای جدا کردن اکسیژن خالص (۱۹۰۲).

این سیستم، دو مدار تبخیر دارد. هوای فشرده‌ای که باید مایع شود از راه لوله‌های پایینی سمت چپ وارد می‌شود. نخستین مرحله غنی‌سازی در تبادلگر میانی انجام می‌گیرد. بخارهای اکسیژن و نیتروژن در ستون بالایی از اکسیژن غنی شده‌اند. مداری از گازهای مایع شده بوسیله لوله‌های خارجی، از بالا به پایین در بخش بالایی و از پایین به بالا در بخش پایینی ایجاد می‌شود. اکسیژن خالص تبخیر شده از پایین و سمت راست، و نیتروژن ۷٪ از بالا و سمت راست خارج می‌شوند.

### الکترولیز در صنعت

شرایط راه‌اندازی: دومین روش فیزیکی تولید، که در اواخر سده نوزدهم در اختیار صنعت شیمی قرار گرفت، الکترولیز بود. این روش برطبق روایی فنی - اقتصادی شبیه روایی که در کاربرد سرمای صنعتی دیدیم تکامل یافت. همان مرحله مقدماتی گردآوری اطلاعات علمی، نظری و تجربی در این روش هم دیده می‌شود. طی این مرحله، کاربرد الکترولیز دقیقاً وجود داشت و حتی برای



شکل ۵۴. دستگاهی برای جدا کردن اکسیژن و نیتروژن از یکدیگر.

در بخش پایینی، یک تبادلگر گرما ۱ در اکسیژن مایع قرار دارد. اکسیژن مایع، در لوله‌های میانی راست، تبخیر می‌شود. مخلوط گازی که در ستون تقطیر بالایی که از نیتروژن غنی است جریان دارد در لوله‌های ۲ مایع می‌شود و از طریق لوله‌های بیرونی سمت چپ، به بالای دستگاه باز می‌گردد و نیتروژن خالص از آنجا از راه لوله سمت راست فرار می‌کند.

گالوانوپلاستی تطبیق داده شد.

اما وسایل استفاده از آن در یک برنامه وسیع صنعتی تا مدت‌ها وجود نداشت. مرحله رفع محاصره، خصلت ویژه‌ای داشت. برای سرد کردن و جداسازی گازهای هوا، دیده شد که دو رشته فعالیت، بدون ارتباط با یکدیگر، این مرحله را پشت سر گذارند. اینها از یکسو، پراتیک ساخت ماشینهای یخساز، و از سوی دیگر، ادامه پژوهشهای فیزیکی درباره مایع کردن گازهای دائم بودند. در مورد الکتروشیمی می‌توان گفت که، حادثه‌ای بتنهایی یک برنامه صنعتی را به پیش راند، و آن استفاده از دینامهای برگشتپذیر به جای مگنتهای دارای آهنربای دائم برای تولید جریانهای قوی برق بود.

چنین شباهتی در کار راه اندازی الکترولیز هم دیده می شود. صنعتگران یا فیزیکدانان متعددی، بزودی دریافتند که الکترولیز چه فوایدی دارد و در مدت کوتاهی، انواع دستگاههای الکترولیز ساخته شد. باین حال، فراورده هایی که از این راه به دست آمد، به مدت بیست سال، جز سود مختصر اقتصادی، چیز دیگری نداشتند. مؤسسات مختلف این روشها را پذیرفتند، یا اینکه برای کاربرد آن ساخته شدند. اما توسعه واقعی این صنعت، تنها از سالهای ۱۹۲۰ آغاز شد - زمانی که بویژه کلر، در اثر پیشرفتهای سریع شیمی صنعتی آلی به ماده خام فراورده های متعددی تبدیل شده بود.

تأثیر الکترومتالورژی: در سالهای ۱۸۸۰ بود که الکتروشیمی در واقع به معنای اعم خود، بسرعت رواج گرفت. در این سالها تولید برق صنعتی آغاز شده بود، اما، متالورژی پیش از بقیه رشته ها از آن منتفع شد. تردیدی نیست که موفقیت های الکترومتالورژی بود که انگیزه کارهای انجام گرفته برای استفاده از الکترولیز در بعضی از رشته های شیمیایی شد.

باید گفت که پیش از آنکه برق صنعتی در دسترس قرار گیرد، واکنشهای مهمی از تجزیه بوسیله برق، تجزیه آب، قلیاها و نمکهای قلیایی و حتی چند طرح کاربردی کاملاً شناخته شده بودند. اما تا زمانی که پیل شیمیایی تنها منبع برق قابل استفاده بود، الکترولیز، در رقابت با روشهای شیمیایی تولید، روش بسیار گرانی بود. از این روش، تنها برای تکثیر قطعات هنری، مدالها و الواح تزئینی استفاده می شد؛ یا اینکه قطعات زینتی ساخته شده از فلزات معمولی را، بدان وسیله آب نقره یا آب طلا می دادند.

در سال ۱۸۳۷ یک معلم مقیم دورپات<sup>۱</sup> در استونی به نام موریس هرمان یاکوبی روش گالوانوپلاستی را برای اجرای نخستین آبکاری با این روش، یعنی رسوب دادن مس روی قالبهای فلزی یا گچی که با گرافیت مداد اندود شده بودند، اختراع کرد. آقای فاراده قانون مشهوری را که نام وی روی آن است و نیز اصطلاحات خاص مربوط به تأثیر جریان برق روی مایعات را تنها چهار سال زودتر کشف و وضع کرده بود. در سال ۱۸۴۰ آقایان هنری و ریچارد الکینگتن، دست به کار آب طلا و نقره دادن با روش الکترولیز شدند.

آنان برای این کار از حمامهای قلیایی و طبق روش جان رایت از سیانور استفاده می کردند. آقای هانزی دوروئولس هم در فرانسه، در همان سال، مستقلاً روشی برای اجرای همین کارها اختراع کرد؛ روشی که آقای کریستوفل زرگر بی درنگ آن را به کار گرفت و شهرتی به هم رسانید.

خالص کردن مس تا سال ۱۸۶۹ عملی نبود. در فصلهای برق دیده شد که دینام در این زمان بوسیله گرام اختراع شد که تا حدی برای رفع نیازهای گالوانوپلاستی بود. همین که بهای برق



صنعتی بدین ترتیب تا سه چهارم بهای برق پیل پایین آمد، استفاده از الکترولیز برای تهیه فراورده‌های شیمیایی بی‌درنگ رواج گرفت.

تمامی اطلاعات علمی، هم در کارهای آزمایشگاهی و هم در عملیات صنعتی اولیه - که بسیار محدود بودند، کاملاً در نظر گرفته می‌شدند. بدین ترتیب، کارهای آزمایشی روی آن گروه از دستگاه‌های صنعتی تمرکز می‌یافتند که برای ساخت هر یک از تولیدهای جدید مورد نظر لازم شمرده می‌شدند. هدف، ایجاد شرایطی بود که پایین آوردن هرچه بیشتر هزینه تولیدی فراورده ساخته شده را ممکن سازند. میدان کاربرد الکترولیز در شیمی صنعتی بی‌درنگ شامل تجزیه آب برای تهیه هیدروژن و تجزیه کلروهای قلیایی یا قلیایی خاکی برای تولیدهای گوناگون: کلر، فلز، باز، فراورده‌های سفیدکننده، کلراتها و ... شد. شاخه اخیر، پیشرفتهای بسیار مهمی داشت.

### هیدروژن

الکترولیز آب: درباره شرایطی که برای الکترولیز آب لازم است، اطلاعات دقیقی در دست است. همه می‌دانند که آب خالص نمی‌تواند الکترولیت باشد و تجزیه آن با جریان برق، زمانی ممکن است که محلولی با مقدار کمی اسید یا باز به آن افزوده شود. کارهای آقای تومازی<sup>۱</sup> در ۱۸۸۲ و آقای دوته<sup>۲</sup> در ۱۸۸۹ نشان دادند که نتایج تقریباً بی‌اهمیتی که با آب خالص به دست می‌آید، تنها برخاسته از واکنش آب با الکترودهای به کار رفته است.

نخستین راه حل پیشنهادی عبارت بود از اینکه الکترولیز آب در مجاورت  $1/20$  اسید سولفوریک انجام گیرد. باین حال، این روش به مدت چند سال در کنج آزمایشگاه‌ها، منزوی ماند زیرا به دست آوردن هیدروژن مخلوط ناشده با اکسیژن دشوار بود و یقین نبود که این هیدروژن در شرایط واکنش، باقی بماند؛ وانگهی سود اقتصادی این طرز تولید هم ناچیز بود.

هیدروژن برای بالون: نخستین روشهای دارای خصلت صنعتی، ویژه رفع نیازهای بالونهای جنگی شد. یک ارتش در جبهه باید قطاری از دهها خودرو داشته باشد تا وسایل و فراورده‌های لازم برای تهیه هیدروژن جهت باد شدن یک بالون را در اختیار داشته باشد. برای برطرف ساختن این مشکل، چنین چاره‌اندیشی شد که تنها هیدروژن فشرده را در سیلندره‌های فولادی حمل و نقل کنند. ارتش انگلستان که در سال ۱۸۸۲ مصر را اشغال کرد، بی‌شبهه نخستین ارتشی بود که از این روش استفاده کرده است.

تهیه هیدروژن از راه الکترولیز ظاهراً نسبت به تهیه شیمیایی آن، که هیدروژن ناخالص تهیه

می‌شود، برتری دارد. همچنین شاید ضرور باشد که یک دستگاه الکترولیز - که در آن زمان ولتامپر گفته می‌شد - را ترکیب کرد تا دو گاز از یکدیگر کاملاً جدا شوند.

یک افسر مهندس فرانسوی، به نام رنار، نخستین کسی بود که در ۱۸۹۰، دستگاه رضایتبخشی را پیشنهاد کرد. وی نخست به جای اسید سولفوریک از سود به عنوان الکترولیت استفاده می‌کرد. این ابتکار امکان داد تا الکترودهای آهنی یا چدنی به جای الکترودهای پلاتینی به کار برده شود. سپس میانبد (دیافراگم) پنبه نسوز گذاشت که پایداری آن در برابر عبور جریان برق از پایداری آجر پوک بسیار کمتر است. ظرفی آهنی محتوی الکترولیت، کاند دستگاه بود؛ یک لوله مشبک که کیسه بزرگی از پنبه نسوز آن را در میان گرفته بود، آند دستگاه را تشکیل می‌داد. یک باتری مرکب از دو واحد که سه متر بلندی و ۳۰ سانتیمتر قطر داشت و هزینه تولید آن بسیار کم (۲۰۰ فرانک) بود در ناحیه شاله - مودون<sup>۱</sup> مستقر شد. هر واحد ۱۵۸ لیتر هیدروژن در ساعت تولید می‌کرد. حساب شده بود که قیمت هر مترمکعب گاز از ۶۰ سانتیم بیشتر نخواهد شد. در این محاسبه نه تنها هزینه کاردینام، که ماشین بخاری آن را به کار می‌انداخت منظور شده بود بلکه هزینه عملیات فشار گاز تا ۱۲۰ اتمسفر نیز به حساب آمده بود. دستگاه آقای رنار مدت ده ماه بدون کوچکترین خرابی مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه ساده و محکمی بود و الهام بخش دستگاههای دیگری شد که بعدها به کار گرفته شدند.

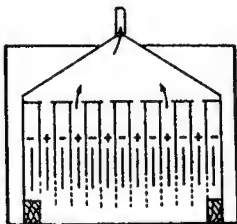
حدود سال ۱۹۰۰ حساب شده بود که با داشتن منبعی از انرژی هیدرولیک، هزینه تولیدی هر مترمکعب این گاز به ۱۰ سانتیم کاهش یابد.

روش دیگری در روسیه احياناً به کار گرفته یا حداقل طرحریزی شد. مبتکر این روش پروفیسوری از سن پترزبورگ به نام د. ا. لاجینوف بود که وسیله خود را در زمانی اعلام کرد که دستگاه رنار شهرتی به هم رسانیده بود. اما گرچه در مطبوعات آن زمان از این دستگاه زیاد نام رفته است، هیچ اطلاع دقیقی از آن در دست نیست.

آغاز کاربرد صنعتی: طی پنج یا شش سال پایانی سده نوزدهم، الکترولیز آب مورد استفاده چندین مؤسسه صنعتی نظیر: Société oxhydrique در بروکسل، Schukert که به Electrizationgesellschaft در منطقه هانائو<sup>۲</sup> واقع در هسه - ناسائو<sup>۳</sup> تغییر نام داده بود، شد. وسایل مورد استفاده آنها، با وسایل آقای رنار تفاوت چندانی نداشت. الکترولیت، همیشه محلول رقیق سود بود. دستگاه الکترولیز به حجره های مرتبط با یکدیگر تقسیم شده بود و میانبندها از

1. Chalais-Meudon 2. Hanau

۳. Hesse-Nassau: ایالتی که در سال ۱۸۶۸ از اتحاد هسه-ناسائو و فرانکفورت تشکیل شد.



شکل ۵۵. دستگاه الکترولیز گاروتی؛ برای الکترولیز آب در بروکسل.

ورق آهن مشبک ساخته می‌شد و هرکدام، گازها را به‌سوی ناقوسی در بالا هدایت می‌کردند تا در آنجا جمع‌آوری شوند. (شکل ۵۵).

در مرحله نخست کاربرد صنعتی، اکسیژن و هیدروژن را برای استفاده در جوشکاری اکسیدرونی (جوشکاری با اکسیژن - هیدروژن) به‌کار می‌گرفتند. بعدها با آغاز سنتز آمونیاک، هیدروژن به یک ماده خام بسیار سودمند تبدیل شد. اما منبع اصلی آن گاز آب بود که طرز تهیه آن را بخوبی می‌دانستند و مخلوط کردن آن با گاز ضعیف گازساز، پس از تصفیه آن از اکسید کربن و گاز کربنیک با نسبتهای دلخواه، چنانکه بعدها خواهیم دید، کاری بسیار آسان بود. تنها زمانی که سنتز آمونیاک گسترش زیادی یافت مؤسساتی که در جوار منابع انرژی هیدرولیک قرار داشتند به استخراج هیدروژن آب به هدف استفاده اقتصادی دست زدند و بدین جهت از حمل و نقل زغال در محلهای تولید هیدروژن، ساخت کوره و عملیات تصفیه گاز پرهیز داشتند.

یک کاربرد بسیار ویژه الکترولیز که از همان آغاز این صنعت عملی می‌شد، تصفیه آبی بود که برای مصرف خانگی تهیه می‌شد. در این کار از اکسایش الکترودهای آهنی استفاده می‌شد. این الکترودها را افقی و به‌طور پیچ و خم‌دار قرار می‌دادند و قسمت‌های آن را از بالا به پایین جریان پیوسته‌ای از آب می‌شست. اکسید آهن، مواد آلی را به‌شکل یک توده ژلاتینی در یک ظرف جمع‌آوری می‌کرد و هیدروژن تشکیل شده فرار می‌کرد درحالی که مواد جامد در آب معلق می‌ماندند، حدود سال ۱۹۰۰ شرکت Stanley Electric Co آب آشامیدنی فیلادلفی را با همین روش تصفیه می‌کرد.

## کلورها، کلر و قلیاها

شرایط الکترولیز کلورهای قلیایی یا قلیاییهای خاکی در حدود سال ۱۸۸۰ در سایه پژوهشهای آزمایشگاهی که پس از آغاز این سده در همه جا ادامه داشت، بهتر از الکترولیز آب شناخته شده بود. بکرل در سال ۱۸۴۳ الکترولیز در محلول آبی را برای تهیه کلر و سود پایه گذارد. چند آزمایش نیز نشان دادند که الکترولیز گرم، بسته به دمای آن، کلرات پتاسیم یا هیپوکلریت می دهد. اما همه اینها تا زمانی که وسیله تولید برق ارزان وجود نداشت در تولید صنعتی کاربردی نداشتند.

چنین می نماید که برخلاف نخستین کاربردهای دیگر برق، الکترولیز نمکها با تأخیری نسبتاً طولانی پانزده تا بیست سال در شیمی صنعتی به کار گرفته شد. در اوایل کار میلی به تولید کلر و سود وجود نداشت زیرا از طرز تولید آن با روشهای شیمیایی، که مستلزم داشتن تأسیسات بسیار مهم و نیز پرهزینه، اما بسیار بادوام بود آگاهی داشتند. وانگهی، کلر، به زحمت، چند کاربرد باصرفه یافته بود. در واقع این کار بیشتر دست و پاگیر بود و تا سال ۱۹۲۰، زمانی که کلر به ماده خام بسیار برمصرفی تبدیل شد پابرجا ماند.

رنگبری خمیر کاغذ: کاملاً روشن و منطقی است که نخستین کاربردهای صنعتی در رشته تهیه حمام بیرنگ کردن بوسیله الکترولیز، در داخل خود دیگ تهیه فراورده هایی باشد که متحمل این عملیات شیمیایی هستند، مثلاً خمیر سلولوز یا نخهای بافندگی. در سال ۱۸۸۲ چند آزمایش انجام گرفتند اما بزودی کنار گذاشته شدند. نخستین روشی که در کاغذسازی به کار گرفته شد از آن ارمیت<sup>۱</sup> بود که در سالهای ۱۸۸۵ تا ۱۸۹۰ خود را وقف این کار کرده بود. اساس کار او استفاده از محلول کلرور سدیم و کلرور منیزیم بود. در چرخه واکنشها، منیزیم مکرر به کار می رود. عملیات در دستگاه الکترولیز شامل یک ردیف صفحات روی انجام می گیرد که این صفحات روی یکدیگر می گردند و تشکیل کاتدهایی می دهند که آندهای نعل اسبی بین آنها در محلول غوطه ور می باشند.

کاغذسازان فرانسوی این روش را بی درنگ پذیرفتند و گویا مدت بیست سال آن را به کار می گرفتند تا روشهای دیگری جانشین آن شدند.

کلرات و مواد منفجره: در همان دورانی که این تکنیک به کار گرفته می شد با الکترولیز کلرور سدیم، تهیه صنعتی کلراتهای قلیایی و هیپوکلریتها آغاز شد. کلراتها، بویژه سود و پتاس از میانه سده نوزدهم، پس از آزمایشهای شوم سده هجدهم، در ساخت مواد منفجره به کار گرفته می شدند. روش الکترولیز از همان آغاز ساده تر از روش شیمیایی نشان داده شد. در روش اخیر، که در سال ۱۸۴۲ بوسیله لیبیک شرح داده شده است کلر را روی آهک اثر می دهند، سپس یک تجزیه مضاعف بین کلرات

کلسیم و کلرور پتاسیم، انجام می‌گیرد. اما در واکنش نخست، برخلاف آزاد شدن کلر در داخل محلول کلرور، واکنشهای اکسایش به‌وقوع می‌پیوندند که به تشکیل کلرات پایان می‌یابند.

این روش تولید، بی‌درنگ در سال ۱۸۸۶ در کارخانه‌ای در ولایت اواز، در ویلر-سن-سپولر<sup>۱</sup>، کمی بعد در والورب<sup>۲</sup> واقع در سن میشل دومویرین<sup>۳</sup> و سرانجام در شد<sup>۴</sup> پیاده شد. در زمان جنگ جهانی اول نام آن به ماده منفجره‌ای بر پایه کلرات پتاسیم، شدیت، گذارده شد که در محل آن را می‌ساختند.

دستگاه الکترولیز آقایان گال<sup>۵</sup> و مونتور<sup>۶</sup> در همان مرحله نخست خود، تقریباً در همه جا پذیرفته شد. این دستگاه یک میانبد متخلخل، کاتدی نخست از ورق آهن و بعداً از آلیاژ آهن-نیکل، و آند آن در آغاز از پلاتین و بعداً پلاتین ایریدیم‌دار بود. این آند، ورقه بسیار نازکی بود که روی یک شاسی آهنی قرار داشت. ظرف الکترولیت نخست از گدازه‌های منطقه ولویک<sup>۷</sup> ساخته می‌شد، که بعدها آن را از چوب با آستری از سرب تهیه می‌کردند، خانه‌های دستگاه همچون یک باتری عمل می‌کردند و هر خانه با اتصال موازی تغذیه می‌شد.

آقای کوربن<sup>۸</sup> که در سال ۱۸۹۰ یک دستگاه الکترولیز در کارخانه کاغذسازی برژس کار گذاشته بود برای ساختن کلرات، در ناحیه شد از همان روش استفاده کرد. بین الکترودهای اصلی تعدادی صفحات فلزی به‌طور قائم و عایق نسبت به یکدیگر قرار داشتند که طبق پدیده بسیار آشنایی در نقش الکترودهای واسطه‌ای دو قطبی بودند. سیستم کوربن متحمل دستکاریهای فراوانی شد و اساس آن مبهم است. یکی از دشواری اصلی آن، رسوب الکترولیتی یکنواخت در همه سطح جرم بود.

تهیه کلر: تهیه کلرات در همه کشورهای بی‌درنگ رواج گرفت و معمولاً در نواحی تولید انرژی هیدرولیک تمرکز یافته بود. به‌طور کلی تهیه آن بستگی به ساخت هیپوکلریتها، سود، کلر و پرسلها (نمکهای پراسیدها)، پرسولفاتها، پرکربناتها و پرکلراتها داشت. به‌دست آوردن کلر، چه از راه الکترولیز محلول کلرور، چه با الکترولیز کلرور مذاب در سالهای ۱۸۹۲ - ۱۸۹۸ رواج گرفت. اما از زمان ویلیام کوک، در ۱۸۵۱ و چارلز وات در همان سال، تعدادی اختراعات در رابطه با روش و دستگاههای تهیه کلر در بسیاری از جاها به ثبت رسید.

تهیه کلر از راه الکترولیز همیشه وابسته به تهیه اجسام متعدد دیگری، چه باز و هیدروژن و چه

1. Viller-Saint-Sépulcre 2. Vallorbe 3. Saint-Michel-de-Maurienne 4. Chedd  
5. Gall 6. Montleur

۷. Volvic: دهستانی در ولایت پویی دو دوم فرانسه.

8. Corbin

هیپوکلریتها، زمانی که عملیات با محلول نمک، کلرور سدیم یا کلرور پتاسیم انجام می‌گرفت، بود؛ و نیز طرز هدایت آن، زمانی که از جریان برق برای مذاب نگاه داشتن نمک استفاده می‌شود، بستگی به نوع فلز قلیایی داشت.

پس از اندک مدتی دانستند که نوع واکنشها در محلول بسیار پیچیده است زیرا هیدروژنی که در اثر واکنش فلز بر آب به وجود می‌آید می‌تواند ترکیبات تشکیل شده را احیا کند. اما همه این مشکلات با کاربرد دستگاههای الکترولیزی دارای میانبندها یا دارای کاتد جیوه‌ای، آسان برطرف شدند.

مجموعه اطلاعات به دست آمده، حل مشکلات نظری مربوط به مشخصات جریان برق، ولتاژ و آمپراژ و بازده‌هایی که می‌توانند توقع داشته باشند را بسیار ساده کرد. کاربرد تئوری در عمل، سبب شد که دشواریهای دیگری در زمینه نوع میانبندها، وضع آن نسبت به الکترودها، شکل کلی دستگاههای الکترولیز و بالاخره نوع الکترودها پدید آیند. حل این مشکلات با در نظر گرفتن وسایلی که در اختیار سازندگان این زمان بود، فی‌نفسه چنان دشوار نبود. آنان انواع راه‌حلها را مطرح کردند، اما تنها آزمایش می‌توانست بهترین آنها را برگزیند. پس از چهار یا پنج سال تجربه، بین سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۸۹۵ انواعی از دستگاههای الکترولیز ساخته شدند که چندین ده سال اهمیت داشتند. جنس میانبندها: یکی از مشکلات میانبندها که سبب شد انواع فراوانی از آن ساخته شود انتخاب جنس آن بود. کار میانبندها در دستگاه الکترولیز، جدا کردن فیزیکی فراورده‌های تجزیه الکتروشیمیایی: کلر در آند، سود در کاتد و در همان زمان، جداسازی هیدروژن است تا از واکنشهای فرعی جلوگیری شود.

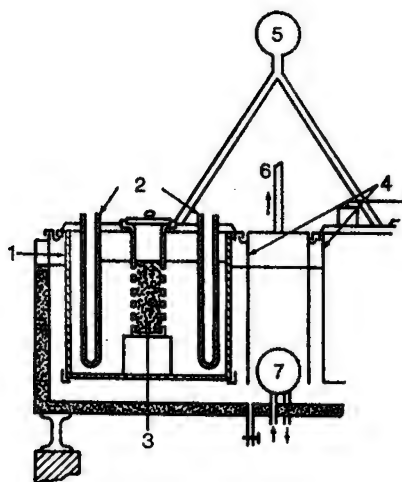
همان‌طور که در مبحث تهیه هیدروژن از آب دیدیم، میانبندها میان آند و کاتد همچون سد متخلخلی عمل می‌کند. در کاربردهای صنعتی که با مقادیر بسیار بزرگی سروکار داریم میانبندها باید پاسخگوی تقاضاهای زیر باشد: یونهای آزاد شده را در جهتی که برق هدایت می‌کند از خود بگذرانند؛ در برابر جریان برق مقاومتش بسیار ضعیف باشد؛ در برابر اثر خوردگی الکترولیتها و فراورده‌های تجزیه آنها، پایدار بماند.

مصالح موجود می‌بایست مورد آزمایش و بررسی قرار گیرند و از میان آنها یکی را برگزینند. پس از اندک زمانی دانسته شد که مصالحی که تا آن زمان در آزمایشگاه‌ها یا جاهای دیگری به کار گرفته شده‌اند از جنبه شیمیایی مقاومت زیاد ندارند و پس از مدتی فرسوده می‌شوند. این مصالح عبارت بودند از: پارشمن، پنبه نسوز، سلیکاژل که در مدتی کوتاه تکه‌تکه می‌شدند. نخست کوشیدند تا مشکل را برطرف سازند و بدین منظور در جریان کار الکترولیز، لایه‌ای از

اکسی کلورهای کلسیم و منیزیم را بر سطح پارشمنی که به عنوان میانبند به کار گرفته می شد، نشست دادند. برای این کار، مقدار کمی از کلورهای کلسیم و منیزیم به الکترولیت افزودند. این روش ظاهراً مدتی حدود بیست سال از ۱۸۸۵ - ۱۸۸۶ در آلمان به کار می رفت.

آزمایشگران دیگری باز در آلمان و در همان سالها، از یکطرف آقای برنور<sup>۱</sup>، در ۱۸۸۴ و از طرف دیگر آقایان ماتز<sup>۲</sup> و وبر در ۱۸۸۶ از نوعی مواد معدنی استفاده کردند که مخلوطی از سیمان، نمک دریا و اسید کلریدریک بود که به شکل صفحاتی درآمد به و پیش از کاربرد، مدت زیادی آن را شسته بودند. آقایان اوتن - شالاندر<sup>۳</sup> نیز در سال ۱۸۹۰ از سیمان برای ساختن میانبند دستگاه الکترولیزی استفاده کردند که تا مدتها در فرانسه فعال بود و لوله های سیمانی در آن بعدها با لوله های سرامیکی سیلیکو - آلومینی (حدود ۱۹۲۸) عوض شدند. نمونه دیگری از کاربرد چنین مصالحی، استفاده از کاسه های شیشه ای یا چینی بود که درون یکدیگر گذاشته می شدند و ملاطی متخلخل از الیاف پنبه نسوز آنها را از یکدیگر جدا می کرد. این سیستم که ابتکار آقای گرین وود در سال ۱۸۸۸ بود بزودی در انگلستان و کمی بعد در امریکا به کار گرفته شد.

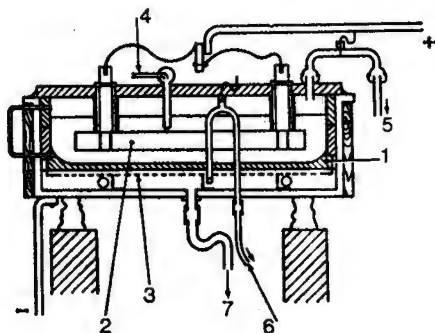
انواع میانبند: این مصالح و ترکیبات فراوان دیگری برای ساخت میانبندهای عمودی یا مایل که بین دو الکترود، در الکترولیت گذاشته می شدند و کاتد یا آند را در میان می گرفتند، به کار گرفته شدند. چنین دستگاه الکترولیزی که بعدها، سلول با دیافراگم غوطه ور نامیده شد، معایب پیشین را باز در خود داشت که از آن جمله، کاهش تدریجی بازده جریان برق، افزایش واکنشهای فرعی در قسمت آند آب و نیز کاتد آب بود (شکل ۵۶). باز در همین زمان، آقایان لوسوئور<sup>۴</sup> در امریکا (سال ۱۸۹۱) و، کارمایکل<sup>۵</sup> در آلمان (سال ۱۸۹۴) نوعی دستگاه الکترولیز ساختند که دارای یک ظرف مایل یا افقی بود که میانبند موازی با کف ظرف گذاشته می شد. در اینجا دیده می شود که باز، نخست از الیاف کاغذ پارشمنی، سپس از الیاف پنبه نسوز که نمکهای معدنی، سولفات باریم آن را در میان گرفته اند استفاده شده است. این مصالح روی یک توری سیمی، که همان کاتد است، در ظرف الکترولیت جای دارند. ناقوسی که حامل آند است بالای ظرف آویزان است. هم الکترودها و هم میانبندهای افقی کاملاً در الکترولیت غرقه شده اند، در این شرایط، سود و هیدروژن در قسمت پایین و کثر از لایه مایع نسبتاً اسیدی گذشته زیر ناقوس جمع می شود. لایه میانی که میانبند و کاتد در آن است، خنثی می ماند (شکل ۵۷). این دستگاه، بیست سال بعد در آلمان متحمل اصلاحاتی شد و شکل نهایی خود را به دست آورد. از جمله برتریهای این دستگاه، به دست



شکل ۵۶. دستگاه الکترولیز با میانبند شناور، برای الکترولیز کلر و پتاسیم. یک محفظه دارای عایق گرما، که از یک میانبند غوطه‌ور ۱، که درون آن آند ۲هایی از جنس مگنتیت گذاشته شده‌اند و ظرف مشبکی ۳ محتوی کلرور پتاسیم تشکیل شده است. این دستگاه یک کاتد آهنی ۴، یک راه فرار کلر ۵ و راهی برای فرار هیدروژن ۶ و نیز لوله آلای ۷ برای گرم کردن با بخار دارد.

آمدن محلول غلیظتری از سود، و بازدهی در ردیف ۹۵٪ از جریان است. سرانجام، باز در همان زمان، آقای هارگریوز، نوع دیگری دستگاه الکترولیز طرح کرد. کار او نتیجه بررسی سنجیده‌ای از سال ۱۸۹۰، نخست با همکاری تامس برد، درباره همه روشهای الکترولیز در آن زمان بود. وی پس از مرگ برد، نخستین اختراعات خود را با ذکر هر دو نام به ثبت رسانید و یک شرکت انگلیسی در سالهای بعد آن را عملی ساخت. پایه کار وی ساختن ظرف با دیواره‌هایی از میانبند عمودی مجاور یک توری مسی، در نقش کاتد دستگاه بود. میانبند در این دستگاه، نسبت به کاتد که غوطه‌ور نبود، نقش صافی را داشت. در فضای بین این دو، جریانی از گاز کربنیک و بخار آب که با میعان خود تماس کاتد-آند را تأمین می‌کرد، گردش داشت. آندها در وسط ظرف بودند و با پر کردن قسمت بیشتر حجم، کار به پایان می‌رسید. جزئیاتی از این دستگاه در زیر آورده می‌شود: کاربرد الیاف پنبه نسوز در لفافی از سیلیکات سدیم برای میانبند، تقویت کاتد با یک شبکه فلزی پشتگیر، الحاق میانبند به کاتد. شکل و تشکیلات آند طی کاربرد، به‌طور محسوسی متحول



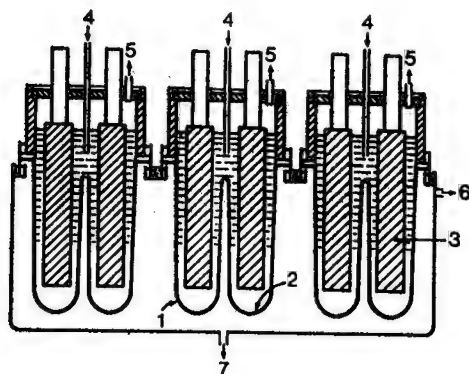


شکل ۵۷. دستگاه الکترولیز با میانبند افقی؛ برای الکترولیز نمک محلول.

در این شکل، میانبند ۱، آند گرافیتی ۲، کاتد آهنی ۳ دیده می‌شوند. محلول کلرور سدیم از لوله ۴ وارد می‌شود. کلر از ۵ و هیدروژن از ۶ و سود از ۷ خارج می‌شوند.

شدند. انواع دیگری از دستگاه الکترولیز که بر همین اصل صاف کردن سود بوسیله میانبند ساخته شدند در سال ۱۹۰۰ پیاپی به نمایش گذاشته شدند. همه این دستگاهها بازده جریان بسیار بالایی، حدود ۹۷٪ داشتند. خلوص کلر آنها، بیشتر از دستگاههای دیگر بود و محلول سود آنها غلیظتر (شکل ۵۸).

الکترودها: مسأله ساخت الکترودها نیز بسیار سریع حل شد. کاتدها در تماس با کف قلیایی، بی‌درنگ با صفحات مشبک تشکیل پنجره‌ها یا توریهای سیمی می‌دادند، و خراب نمی‌شدند. اما در مورد آندها، که دستخوش خوردگی کلر هستند، مسأله، به شکل دیگری است. بهترین مصالح برای آندها، پلاتین بود بشرطی که مقادیر مهمی که برای باتریهای الکترولیز لازم است و چندین مترمربع پهنه دارند زیاد گران تمام نمی‌شدند. باین‌همه، گاه‌گاهی از پلاتین، به شکل خالص یا آلیاژ با ایریدیم، برای سی یا چهل سال استفاده شد؛ و زمانی هم کوشیدند که به جای آن از فلزات معمولی پوشیده با ورقه نازکی از پلاتین استفاده کنند - روشی که تا کنون گویا ناموفق بوده است. زغال چوب از همان آغاز کار، با اینکه کاربرد آن دشوار بود، جسم بسیار خوبی شناخته شد. پایداری آن در برابر تأثیر شیمیایی کلر، در واقع به حالت فیزیکی و دستکاری سطح آن بستگی دارد. زغال قریح که آقای یونزن از سال ۱۸۴۲ در پیلی که نام خود وی را دارد آن را به کار می‌برد بی‌درنگ خود را بسیار ناپایدار نشان داد. همچنین به مدت ده سال، همه تکنسین‌هایی که دستگاه الکترولیز می‌ساختند، هر یک بنوبه خود فرمولهایی برای اصلاح زغال ویژه ساخت آند پیشنهاد



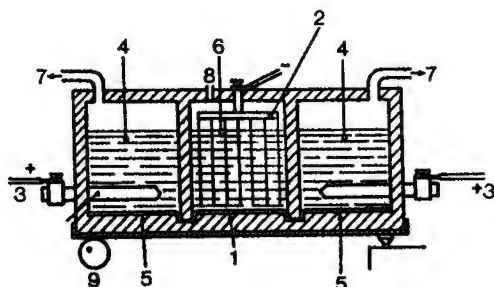
شکل ۵۸. دستگاه الکترولیز با میانبند صافی کریس؛ برای الکترولیز نمک محلول.

مجموعه‌ای از چند دستگاه الکترولیز است که هر کدام دارای کاتدی از ورق مشبک آهن ۱، میانبندی از پنبه نسوز که درون کاتد جای دارد ۲، آند از گرافیت اچیسن ۳ است. نمک طعام محلول از مجرای ۴ وارد می‌شود، کلر از مجرای ۵، هیدروژن از ۶ و سود محلول از ۷ خارج می‌شوند.

کردند و همگی این فرمولها در جهتی بودند که بیشترین همگنی ممکن، به جرم داده شود. این روشها اساساً بر این پایه بودند که زغال را، که مخلوطی از چند ماده زغال شدنی بود، در معرض پختهای کم و بیش طولانی و گاهی مکرر قرار دهند.

سرانجام آقای اچیسن امریکایی، مخترع کریوراندم، در سال ۱۸۹۹ - ۱۹۰۰ بهترین روش را، با پخت مضاعف زغال در مجاورت اجسام گوناگون ارائه کرد. با این روش زغالی مناسب آند بادوام زیاد (سه تا هشت ماه) به دست می‌آید. زغال اچیسن از همان آغاز به رایجترین جسم در الکترولیز کلروها تبدیل شد؛ گرچه بعدها اجسام دیگری نیز آزمایش شدند.

دستگاههای الکترولیز بدون میانبند: برای برطرف ساختن مشکلات میانبند و حذف همه واکنشهای فرعی کلرور سدیم با الکترولیت، بزودی چنین اندیشیدند که کاتد را جیوه‌ای بسازند تا سدیم در آن به شکل ملغمه، متناسب با آزاد شدن از الکترولیت، حل شود. نخستین اختراعاتی که در این باره به ثبت رسیدند در سال ۱۸۹۲ در انگلستان به نام کاستنر<sup>۱</sup> و در آلمان به نام کلنر بودند. این اختراعات بی‌درنگ توسط شرکتی که این دو نفر تأسیس کردند به کار گرفته شدند. دستگاههای آنها بسیار مشابه بودند، گرچه آقای کلنر در آغاز نوعی دستگاه الکترولیز مختلط طرح کرده بود که دارای یک کاتد جیوه‌ای و میانبندها بود. گویا این دستگاهها پس از اندک مدتی کنار گذاشته شدند.



شکل ۵۹. دستگاه کاستر با کاتد جیوه‌ای؛ برای الکترولیز نمک طعام محلول.

کاتد جیوه‌ای ۱ پنجره آهنی تغذیه کاتد ۲، آند زغالی ۳، دو بخش محتوی آب نمک ۴، لایه ملغمه سدیم ۵، ظرف تجزیه ملغمه، تشکیل سود ۶، خروج کلر ۷، خروج هیدروژن ۸، چرخک همزن.

این دستگاهها بر پایه استفاده از ظرفی سه بخشی بود که جدارهای آنها بدون اینکه با کف ظرف تماس داشته باشند در جیوه فرو رفته بودند. کار الکترولیز در دو بخش مجاور یکدیگر، هر کدام با آندی انجام می‌گیرد. بخش وسط تنها آب و محلول رقیق قلیا را دریافت می‌کند. این ظرف دارای توازن منظم است و جیوه از یک بخش به بخش دیگر گردش می‌کند. ملغمه در تماس با آب موجود در بخش وسط تجزیه می‌شود (شکل ۵۹).

روشهای کاستر و کلتر، امتیاز سادگی را داشت، یعنی بهای تمام شده فراورده زیاد بالا نبود. آنها پس از مدت کوتاهی، همه روشهای پیشنهادی دیگر را، که گردش جیوه در آنها با وسایل مکانیکی پیچیده‌ای انجام می‌گرفت و در نتیجه اتلاف جیوه زیاد داشتند، از میدان بیرون کردند. وسایلی که جانشین آنها شدند، با این ظرف سه بخشی تفاوت بنیادی نداشتند و تنها چند تفاوت جزئی در آرایش «پیل» تجزیه ملغمه و گردش جیوه و ملغمه دیده می‌شد.

اهمیت جدید کلر: کلر که در گذشته، فراورده فرعی مزاحمی بود در اواخر سده نوزدهم به ماده خام بیش از پیش مورد نیاز صنایع شیمی تبدیل شد. افزایش این تقاضا در زمان کاربردهای نخستین صنایع الکترولیز کلرورها، در حدی بود که بتواند پژوهش روشهای متعددی که در سالهای ۱۸۸۵ تا ۱۹۰۰ بشدت دنبال می‌شدند و نیز سرمایه‌گذاریهایی را که تأسیسات جدید می‌طلبیدند توجیه کند. کلر برای نخستین بار در سال ۱۸۸۸ بوسیله BASF به بازار آمد. از این زمان به بعد آن را به شکل مایعی که، به کمک تجهیزات میعانی که آقای ر. کنیچ برای همین کار اندیشیده بود، تحویل می‌دادند. این روش پیاپی و منظماً تکمیل شده است.

گازی که در دستگاههای الکتrolیز جمع می شود، کمی گاز کربنیک و هیدروژن، و مقدار زیادی بخار آب دارد. برای بی آب کردن این روش، که کلاسیک شده بود، از برجهای تغلیظ سنگ ماسه ای استفاده می کردند. و اسید سولفوریک را به شکل قطرات باران از بالا در برجها می ریختند. برای میعان کلر، دو روش به کار گرفته شدند: پایین آوردن دما با دانانت گاز کربنیک در ماریجی که ماریج گردش کلر را احاطه کرده است، و در شورابی که در  $25^{\circ}\text{C}$  - نگاهداری می شود غوطه ور است؛ فشار را به ۸ تا ۱۰ اتمسفر بالا برده و سرد می کنند. هر دو روش از سالهای نخستین سده بیستم به کار گرفته شدند.

اما در سالهای جنگ جهانی اول بود که تهیه کلر با روش الکتrolیز بخاطر نیاز فراوان به آن برای ساخت گازهای جنگی: کلر، فسژن، ایپریت، گازهای دودزای، گسترش فراوان یافت. پس از جنگ، تبدیل فراورده های این صنایع به فراورده های دیگر آسان می نمود. تحویل کلر مایع در بطریهای فولادی و بزرگ و حتی در واگنهای مخزنی در محل کاربرد، لزوم در اختیار داشتن و تولید پیوسته تأسیسات نسبتاً دست و پاگیر این ماده شیمیایی را، که کاربرد آن غالباً گاه گاهی بود، حذف کرد.

آمده است که مصرف کلر مایع نسبت به مصرف کلر در آلمان از ۹/۷٪ در ۱۹۱۳ به ۱۷٪ در ۱۹۱۹ و به ۳۰٪ در ۱۹۲۲ رسید. در فرانسه، همین درصد در سال ۱۹۳۰ به ۲۴/۸ و در ۱۹۶۷ به ۴۲/۶ رسید، در حالی که مصرف کل آن در همین دوران از ۲۹۰۰۰ به ۷۶۶۰۰۰ تن بالغ شد. دلیل اهمیت اقتصادی جدید کلر در این نیم سده، همانا کاربرد صنعتی ترکیبات آلی برای تهیه فراورده های بسیار گوناگون است. این عنصر در تهیه ترکیبات اساسی برای ساخت حشره کشها، لیزانه ها، مایعات ضد یخ، مایعات سرد کننده، ترکیبات ضد کوبش (بنزین)، حلالها، الیاف مصنوعی، مواد پاکساز، مواد سنتزی از انواع مختلف و غیره دخالت دارند. ترکیبات معدنی آن نیز در رشته های گوناگون شیمی صنعتی تأثیر کمتری ندارند. علاوه بر مشتقات سیلیسیمی آن که در سال ۱۹۴۵ همراه با سیلیکونها گسترش چشمگیری یافت، نمونه دیگری، مثلاً تیتان، می تواند نشان دهد که چگونه دسترسی آزاد به یک جسم، کلر، سبب شکوفا شدن یک شاخه از صنعت می شود که تا حدود سال ۱۹۴۰ اساساً وجود نداشته است. از زمانی که احیای کلرور تیتان بوسیله منیزیم عملی شد کاربردهای صنعتی تیتان به طور جهشی توسعه یافتند. در گذر ده سال ۱۹۴۷ - ۱۹۵۶ تولید جهانی تیتان از ۲ به ۳۵۰۰۰ تن رسید.

فلزهای قلیایی: کاربرد اخیر الکترولیز صنعتی، تهیه فلزهای قلیایی با روش الکتروشیمیایی، با کمی تأخیر نسبت به روشهای تهیه کلر، قلیاها و ترکیبات گوناگون آنها، پدید آمد.

روشهای کاستنر و کلنر برای الکترولیز محلول آبی با کاتد جیوه‌ای، برای تهیه فلز با تقطیر ملغمه جیوه، به جای عمل آوردن با آب، مدت چند سال رواج داشتند. از آنجا که تقطیر تدریجی موجب اتلافهای پرخرج جیوه بود، در ممالک متحده امریکا، حدود سالهای ۱۹۰۲ - ۱۹۰۴ و کمی پس از آن در آلمان پیشنهاد شد که ملغمه را در دستگاه دومی که در آنجا، ملغمه نقش آند را دارد، الکترولیز کنند.

در همان دوران، الکترولیز ترکیبات مذاب را با استفاده از یک کاتد مایع که از یک فلز معمولی، مثلاً سرب، کادمیم یا قلع تشکیل می‌شد آزمایش می‌کردند. اما این گرایشها کمی بعد در صنعت کنار گذاشته شدند، زیرا تجزیه آلیاژ به دست آمده دشواریهایی پدید می‌آورد.

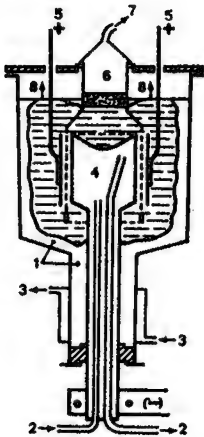
وانگهی در بیش از ده سال پیش از آن، در ۱۸۹۰، آقای کاستنر توانسته بود از سود مذاب، بین الکترودهای جامد، سدیم را استخراج کند. این روش در چند سال تکمیل شد و تا کلریدها بسط یافت. شرایط نظری الکترولیتهای مذاب را آقای ر. لورنتس آلمانی، بعداً در ۱۹۰۵ بررسی کرد. در این زمان یکنوع دستگاه صنعتی در مؤسسات گوناگون مورد استفاده قرار می‌گرفت.

کارهای تحقیقی پس از شروع پراوتیک، عملیات تکمیلی دستگاه را با به دست آوردن اطلاعاتی درباره افزایش رسانایی برقی ترکیبات در اطراف نقطه ذوب آنها و نیز تعدادی واکنش جانبی در الکترولیت و باز درباره انحلال پذیری فلزات در الکترولیت و غیره، جهت دادند.

دستگاه شامل ظرفهای آهنی یا چدنی بود که در موقع الکترولیز، از آنجا که خطر انفجار هیدروژن، که در کاتد با سدیم آزاد می‌شود و اکسیژنی که در آند متصاعد می‌شود، در میان بود، پس از اندک مدتی، ظرفیت دستگاه را بسیار محدود کردند (شکل ۶۰). برای الکترولیز کلرورها، این ظرفها را از زغال یا از آجر نسوز می‌سازند، زیرا کلر آزاد می‌شود (شکل ۶۱).

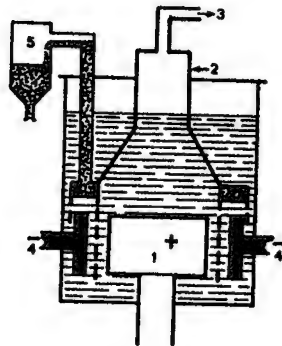
الکترودهای فلزی برای سود مناسب هستند، اما برای کلرورها، آند طبعاً باید از زغال چوب باشد. در هر دو مورد، از همان گامهای نخستین، برای اینکه فلز در سطح الکترولیت، نزدیک ظرفی که برای گردآوری آن است، جمع می‌شود، باید از میانه‌بند استفاده شود. با اینکه باید با گذراندن برق، الکترولیت را در حالت مذاب نگاه داشت، لازم است وسایلی جهت گرم کردن کاتد پیش‌بینی شود تا به هنگام توقف دمای عملیات، جرم بسته نشود.

الکترولیز پتاس در سال ۱۹۰۹ عملی شد اما گویا بیشتر از الکترولیز کلرور پتاسیم، در تهیه



شکل ۶۰. دستگاه الکتrolیز سود مذاب.

سود مذاب با لایه‌ای از سود جامد ۱، پوشیده می‌شود. جریانی از گاز ۲، نوک کاتد را گرم، و جریانی از آب سرد ۳، پایین آن را خنک می‌کند. میانبندی که بین کاتد ۴ و آنود ۵، گذاشته شده است سدیم را به سطح الکتrolیت ۶ می‌راند. هیدروژن از ۷ و اکسیژن از ۸ فرار می‌کنند.



شکل ۶۱. دستگاه الکتrolیز تحت فشار؛ برای الکتrolیز کلرورهای قلیایی مذاب.

ناقوسی آهنی ۲، در بالای آنود ۱ قرار دارد تا کلر در ۳ جمع شود. میانبندی که بین آنود و کاتد ۴ گذاشته شده است، سدیم را به طرف مخزن ۵ راهنمایی می‌کند.

صنعتی این فلز به کار گرفته نمی شد. در واقع پتاسیم در مجاورت هوا آسانتر از سدیم اکسید می شود و تجهیزات لازم برای تهیه آن بسیار پیچیده هستند.

کاربرد سدیم در صنعت: در گذر این سده، سدیم بنوبه خود، ماده خام مهمی در صنایع شیمی شده بود. مدتهای زیاد، از زمان کشف آن بوسیله هامفری دیوی در ۱۸۰۷ تا کارهای سنت - کِلر - دوویل روی آلومینیم در ۱۸۵۰، هیچ کاربرد صنعتی نداشته است. روش احیای آلومین بوسیله سدیم به پیدایش فراورده‌ای، آلومینیم، انجامید که بسیار گران بود، بهای سدیم در آن زمان تا بیش از ۱۰۰۰ فرانک بالا رفته بود. اما کنجکاوی در مورد این فلز جدید انگیزه کارهای متعددی برای بهتر کردن شرایط تهیه سدیم فلزی و نیز پایین آوردن قیمت تولیدی آن شد. حدود سال ۱۸۹۰، پیش از صنعتی شدن الکترولیز، این قیمت تا پنج فرانک طلا<sup>۱</sup> پایین آمد.

کاربرد روشهای الکترولیزی، نخست امکان پذیرفتن سدیم به عنوان عامل تهیه آلومینیم را فراهم آورد. اما این فلز قلیایی همه اعتبار اقتصادی خود را هم از دست داد، بلکه برعکس، الکترولیز سود، و بعدها کلرور مذاب آن موجب به بازار آوردن جسمی قابل استفاده برای تهیه فراورده‌های متعددی نظیر سیانید و پروکسید سدیم و وارد کردن آن به شکلی بسیار باصرفه‌تر در تهیه اندیگویی مصنوعی شد. همین کارها توسعه الکترولیز مذاب را سبب شدند.

اما براساس یک پدیده کاملاً آشنای برگشت، بازارهای تازه سدیم، سبب شدند که سودآوری روشهای شیمیایی تولید آن، که از نخستین کاربردهای الکترولیز مذاب، از دست رفته می نمود، باز گردد. احیای هیدروکسید، سود یا نمکهای متعدد به توسط عوامل گوناگون نظیر کربن، سیلیسیم، آهن، بتنهایی یا جمعی، کاربرد خلاً جزئی، انگیزه پیدایش ردیفی طولانی از روشهای شیمیایی قابل استفاده در صنعت شدند. اما الکترولیز باز هم، مهمترین وسیله تولید آن باقی ماند.

در جریان سالهای ۱۹۱۰ - ۱۹۵۰ به برکت پیشرفتهای سنتز آلی، سدیم به یک عنصر مورد استفاده در تعداد بی شماری از صنایع، بویژه برای ساخت عطرها و داروها و نیز به عنوان فلزی سودآور، نظیر بعضی فلزات کمیاب، همچون اورانیم، تیتان، زیرکونیم و غیره، پس از جنگ جهانی دوم، تبدیل شد.

هرچند که کاربرد پتاسیم بسیار محدود بود، این فلز سریعاً در بعضی از صنایع، مثلاً در ساخت سلولهای فوتوالکتریکی مقامی یافت.

بدین ترتیب، دیده شد که الکترولیز در صنایع شیمیایی، یک وسیله نیرومند تولیدی است که مرحله نوین توسعه صنایع شیمیایی بر شانه‌های آن قرار دارد.

۱. franc-or نام فرانک فرانسه از سال ۱۹۲۸ تا ۱۹۵۹، که ظاهراً قابل تبدیل به طلا بود.-م.



## صنعت نوین نیتروژن

در دهه پایانی سده نوزدهم، صنعت شیمی به دو شاخه بزرگ تقسیم شده بود: صنعت معدنی و صنعت آلی. این تقسیم‌بندی، بازتابی از خود رشته شیمی بود که به دو شاخه شیمی معدنی و شیمی آلی تقسیم می‌شد. جدایی این دو شاخه صنعتی، کمتر از شاخه‌های علم شیمی از یکدیگر بودند. در ابتدا، عمل آوردن فراورده‌های شیمی آلی، بشدت تحت تأثیر روشهای شیمی معدنی بود. نمونه‌های بسیار گویای این ادعا، راه‌اندازی روش مجاورتی اسید سولفوریک و افزایش تولید اسید نیتریک، دقیقاً جهت رفع نیازمندیهای مربوط به کار برد روشهای تازه عمل آوردن مواد آلی یا مشتقات آنها بود. اگر به کتابهای شیمی صنعتی آن دوره مراجعه شود، در اینکه صنایع شیمی آلی، بخش کاملاً جداگانه‌ای را تشکیل می‌دادند تردید خواهند کرد. حتی در کتابهای آغازین سده که در آستانه جنگ جهانی اول انتشار یافته‌اند، صنایع شیمی آلی بیش از یک چهارم کتاب را اشغال نکرده‌اند و بیشترین صفحات مربوط به صنایع سنتی: صابون‌پزی، صنایع نشاسته، رنگها و صنایع تکمیل و ... است؛ و طبعاً فراورده‌های مربوط به سی یا چهل سال پیش - رنگهای مصنوعی، دینامیت، باروت بیدود و مشتقات نیتروژندار سلولوز - مورد بحث قرار گرفته‌اند. اما درباره فراورده‌های



بسیار اخیر، مثلاً سیانید و کاربرد آن در تولید آمونیاک، و نیز اکسایش نیتروژن در کوره قوسی، از دو یا سه صفحه بیشتر صحبت نشده است. نویسندگان این کتابها هنوز اطلاعات کافی نداشتند و غالباً روشهای نوین، لااقل جزئیاتشان مدتها محرمانه می ماند. جزوه ها و رساله ها، متعدد هستند اما تنها نوشتارهای مبهم و ناکاملی را تشکیل می دهند. از سوی دیگر، نتایج صنعتی نامطمئن هستند. هرگز از آزمایشهای نخستین سنتزهای کاتالیزورگری تحت فشار، سخنی به میان نیامده است.

زمانی که به کتابهای سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۱۴ مراجعه کنیم بخوبی احساس می شود که صنعت شیمی هنوز همان صنعت شیمی سده نوزدهم است. متالورژی، به معنای دقیق واژه، معمولاً بیشتر کتاب را فراگرفته است و بقیه به تولیدهای کلاسیک اسیدها و ترکیبات معدنی، مربوط می شود. نویسندگان درباره این موضوعها، با آب و تاب چیز نوشته اند، زیرا تکنسین های شیمی در تکمیل روشهایی، گاهی با کهنگی صد سال، لحظه ای را از دست نداده اند. مبحث جدیدی که تکمیل وسایل را ممکن می ساخت کاربرد دماها، برجهای تبخیر یا میعان، تبادلگرهای حرارتی در انواع گوناگون بود. چنین احساس می شود که این نویسندگان، جز شرح چند صنعت شیمی آلی، که دیگر کلاسیک شده بودند برای بیان فراورده های دیگر، آمادگی ندارند و کتابهای آنها رفته رفته از حالت کتابهای صنعتی خارج، و به کتابهای شیمی آلی تبدیل شده اند و روشهای مشروح در آنها، در اکثر موارد، فراتر از کارهای آزمایشگاهی نیستند.

تنها در نیمه نخست سده بیستم است که تمیز میان این دو شاخه صنعتی شیمی بتدریج برجسته می شود، و بویژه در گذر دو دهه ۲۰ و ۳۰، که برهه میان دو جنگ جهانی است این امر زیاد چشمگیر است. این پدیده در سالهای نخستین این سده، با تکمیل روشهای فیزیکوشیمیایی سنتزهای صنعتی ترکیبات نیتروژنی آغاز شد و با کاربرد این روشها در جنگ جهانی اول و گسترش آنها بلافاصله پس از جنگ تثبیت یافت. انگیزه تازه ای پدید آمده بود و بتدریج که روشهای عمل آوردن فیزیکوشیمیایی فراورده های نفتی تکمیل و بسط یافتند. این انگیزه همه جاگیر شد.

### روشهای تولید آمونیاک

فراوانی نیتروژن در جو زمین، سهولت نسبی تهیه هیدروژن با وسایل سنتی، بزودی انگیزه آزمایشهایی برای ترکیب این دو عنصر و به دست آوردن مستقیم آمونیاک شد. نخستین گامها در این راه گویا آقای فردریک کولمن، صنعتگر فرانسوی برداشت که در ۱۸۳۸ به فکر افتاد با اکسایش مستقیم آمونیاک، اسید نیتریک بسازد. صنعتگران دیگری به دنبال وی رفتند، آنان از کف پلاتین به عنوان

کاتالیزور استفاده کردند. آقای شارل تلیه نخستین کسی بود که در ۱۸۶۵ روشی را به ثبت رسانید که طبق آن، این واکنش تحت فشار انجام می‌گرفت. شیمیدانهای دیگری کوشیدند تا از قوس برقی یا تخلیه آن استفاده کنند.

نیاز محدود به آمونیاک: تا پیش از نخستین دهه سده بیستم هیچ نتیجه صنعتی به دست نیامد. موانع موجود، گوناگون بودند. نخست اینکه آمونیاک با کندی زیاد به مرحله سودآوری رسید. تقاضا برای آمونیاک منحصر به صنایع حاشیه‌ای بود که تنها مقادیر کمی از آن را آن‌ها به شکل نمک، مصرف می‌کردند.

نخستین کاربرد صنعتی آمونیاک، همراه با تولید کربنات سدیم بروش سلوی بود. معلوم است که اجرای این روش بسیار دشوار بود. نویسندگان متعددی در پی به‌کار گرفتن آمونیاک، با نمکهای آمونیم برای تجزیه کلرورسدیم بودند. شکست پیایی همه کسانی که در پی انجام این کار در مقیاس صنعتی بودند، از دایر و همینگ<sup>۱</sup> در ۱۸۳۸ گرفته تا بولوار<sup>۲</sup> در ۱۸۷۲، یا رقابت چند ساله تولیدهای اولیه سلوی، که نخستین امتیاز آن در سال ۱۸۶۳ به ثبت رسید، و دو کارخانه نخستینی که در سالهای ۱۸۷۲ و ۱۸۷۳ گشایش یافتند نتیجه علل گوناگونی بودند که از همه مهمتر قیمت تولیدی شوراب نمک دریا بود. به نظر نمی‌رسد که قیمت تولیدی آمونیاک یا نمکهای آن در آن زمان یک مانع اصلی بوده باشد.

در واقع در اواسط سده نوزدهم، منابع آمونیاک ارزان، به ناگهان فراوان شد. آمونیاک به‌طور سنتی، از سده هجدهم، از تقطیر میزه آب و مدفوع حیوانات، از تکلیس استخوان، شاخ یا بعضی مواد تخمیری تهیه می‌شد. دو صنعت تازه، در آغاز این سده، آمونیاک را به شکل فراورده جنبی تهیه می‌کردند. ساخت قند چغندر که کنجاله‌های تقطیر شده در مجاورت آهک، آمونیاک تولید می‌کرد، در آغاز، منبع قابل توجهی بود، اما اهمیت آن در برابر عمل آوردن آب آمونیاکی به دست آمده از تقطیر زغال سنگ، محدود باقی ماند. تهیه ککهای متالورژی و نیز ساخت گاز روشنایی، بسرعت در ردیف منابع غنی این فراورده جای گرفتند. و تا میانه سده بیستم این مقام را حفظ کردند.

تولید آمونیاک و نمکهای آن از نظر اقتصادی تا مدت‌ها اهمیت صنعتی زیادی نداشت. زمانی که روش سلوی برای تهیه کربنات سدیم مورد بهره‌برداری قرار گرفت، این فراورده‌ها توجه صنعتگران را به خود جلب کردند. در این دوران، ۱۸۷۰ - ۱۸۸۰ نخستین دستگاههای سردکننده نیز به خدمت گرفته شده بودند. وانگهی دیده می‌شود که ساخت آمونیاک از راه سنتز، زمانی ممکن شد که دستکاری گاز مایع و تحت فشار در صنعت رواج گرفت. اما برای نیاز تنهای صنعت سرما، مانند

صنعت سود سلوی، مصرف آمونیاک نسبتاً محدود باقی ماند، زیرا این ماده در جریان ساخت یا کار ماشین، گردش داشت.

زمانی که مصرف کودهای ازتی در کشاورزی آغاز شد، نیتراتها از رگه‌های طبیعی آمریکای جنوبی به اروپا وارد شد و آمونیاکی که از آبهای تقطیری زغال‌سنگ به دست می‌آمد برای تهیه سولفات آمونیم کاملاً کافی بود.

دشواریهای سنتز صنعتی ترکیبات دیگر نیتروژن و بویژه اسید نیتریک نیز، در سایه روشهای آشنایی به دست می‌آمدند. با وجود افزایش سریع نیاز به آنها در دهه‌های پایانی سده نوزدهم، عرضه کافی باقی‌ماند. قطعی است که این نیازهای جنگی طرفین متخاصم در اروپا، که دست آنها از ذخایر نیتراتهای طبیعی کوتاه شده بود، انگیزه تلاش فراوان برای تولید صنعتی روشهایی بود که در آغاز مخاصصات، بتازگی روبراه شده بودند: تهیه مستقیم اکسیدهای نیتروژن، اکسایش آمونیاک برای تولید اسید نیتریک، تهیه آمونیاک برای سیانامید کلسیمی، و بعدها برای سنتز مستقیم و تحت فشار. وانگهی، تا پایان سده نوزدهم، شیمیدانها از روشهای علمی مربوط به تعیین شرایط دما، فشار، عبور گازها و جذب فراورده‌های عملیات فیزیک و شیمیایی که برای رسیدن به بازده مطلوب دارای کاربرد صنعتی لازم بودند چیزی نمی‌دانستند. رشته شیمی فیزیک، نخستین قوانین بنیادین خود را تا آغاز نیمه دوم سده نوزدهم ارائه نکرده بود. نخستین کاربرد واقعی مجموعه این اطلاعات برای حل یک مسئله شیمی صنعتی، دقیقاً، بررسی آقای هانری لوشاتلیه در سال ۱۹۰۱ درباره واکنش تعادلی در ترکیب مستقیم نیتروژن با هیدروژن بود. این بررسی را شیمیدانهای آلمانی: والتر نرنست، بعداً فریتس هابر و همکارانش تکمیل کردند.

سرانجام، آخرین مانع تولید صنعتی روشهای مستقیم در سده نوزدهم، یک مسئله تکنیکی بود، و آن تهیه هر دو عنصر نیتروژن و هیدروژن، با خلوص رضایتبخش و هزینه معقول یعنی کاری بود که در زمین ما، ظاهراً بسادگی انجام یافته است. این مانع، زمانی برطرف شد که صنعت سرما که آقای شارل تلیه آن را پایه گذارده و لبنده آن را تکمیل کرده بود وسایل لازم برای جداسازی این گازها را با استفاده از میعان و تقطیر تدریجی ایجاد کرد.

نیتروژن می‌توانست مستقیماً از جو گرفته شود، اما هیدروژن تنها با تکامل دستگاههای گازساز، که برای موتورهای گازی، سوخت تهیه می‌کردند و پیدایش روشهای تجزیه الکترولیزی آب، می‌توانست در دسترس قرار گیرد.

پژوهشهای تکمیل روشهای تثبیت مصنوعی نیتروژن، به مدت سه چهارم سده ادامه یافت.

بررسی دربارهٔ این مسائل، می‌توانست شیمیدانهای متخصص در فیزیولوژی گیاهی را، به هم نزدیک کند.

در کار تثبیت نیتروژن جو، این نکته جالب است که روشهای گوناگونی تقریباً همزمان با نخستین مرحلهٔ کاربرد صنعتی آنها شناخته شدند و برپایهٔ روش شیمیایی به توسط سیانامید کلسیک (۱۹۰۴-۱۹۰۵)، اکسایش قوس برقی (۱۹۰۴)، اکسایش آمونیاک (۱۹۰۸) و بالاخره، سنتز کاتالیزوری آمونیاک (۱۹۱۰-۱۹۱۳) قرار داشتند.

سیانامید: همان‌طور که دیدیم، اختراع کورهٔ دارای قوس برقی، بوسیلهٔ مواسان در ۱۸۹۲، روشی برای تولید صنعتی کاربید، ترکیبی که بی‌درنگ، کاربردهای فراوانی یافت، به‌دست داد.

آقای فرانک و کارو، فیزیکدانان آلمانی، برای تهیهٔ سیانید کلسیم، از راه جذب نیتروژن بوسیله کاربید اندیشیدند. در حقیقت، از حدود نیم سده پیشتر، آزمایشهای متعددی نشان داده بودند که در شرایطی کربناتهای پتاسیم و باریت، نیتروژن گازی را تثبیت می‌کنند و بخشی به سیانور تبدیل می‌شوند. در سال ۱۸۶۰ آقایان مارگریت و سوردوال<sup>۱</sup> شیمیدانهای فرانسوی، این پژوهشها را تا تولید آمونیاک از راه تأثیر بخار آب روی سیانید باریم به پیش بردند. این روش بدلیل هزینهٔ بالای سوخت و فرسوده شدن سریع کوره، کاربرد صنعتی نیافت. پس از آن، پژوهشهای متعددی، بویژه با کاربرد سدیم و حتی آلومینیم انجام گرفت، که گویا از لحاظ اقتصادی نتیجهٔ رضایتبخشی داشتند؛ اما، زمانی، که این توفیق اعلام شد، مسألهٔ تثبیت صنعتی نیتروژن از راههای دیگر حل شده بود. آقایان فرانک و کارو پس از اینکه کاربید به قیمت مناسبی در دسترس قرار گرفت، درصدد کاربرد آن به‌عنوان مادهٔ خام در تهیهٔ سیانور کلسیم برآمدند. مسائل پیچیده‌ای، مانند سرعت و تعادل واکنش در ارتباط با دما و حضور نمکهای به‌عنوان کاتالیزور مورد بررسی قرار گرفت؛ اما این دو شیمیدان اظهار داشتند که واکنش جذب، سیانید مورد نظر را تولید نمی‌کند بلکه نمک کلسیم سیانامید می‌دهد که ترکیبات ناپایداری از کربن و نیتروژن است که آقایان کلوته<sup>۲</sup> و کانیزارو در سال ۱۸۵۱ آن را تولید و توصیف کرده‌اند.

سیانامید کلسیم فراورده‌ای است که تحت تأثیر آب، آسان به کربنات آمونیاک و حتی آمونیاک تبدیل می‌شود. نخستین تبدیل، در خاک پدید می‌آید و این زمانی است که سیانامید به‌عنوان کود به‌کار رفته است؛ و دومین، در مرحلهٔ عمل آوردن آن در گرما و فشار با بخار آب است.

تبدیل به آمونیاک: آقایان فرانک و کارو که به خواص این ترکیب جدید علاقه‌مند شده بودند با یاری مؤثر آقای روت<sup>۳</sup>، که در ساخت به آنان کمک می‌کرد و فراودنتال<sup>۴</sup> به مدت ده سال، پژوهش

آنان را دنبال کردند تا بتوانند تولید آن را صنعتی کنند. چنین می نماید که نخستین کارخانه ساخت این فراورده، بوسیله پولتسنیوس<sup>۱</sup> در آلمان گشایش یافت و سیانامید به عنوان کود حدود سالهای ۱۹۰۳ یا ۱۹۰۴ به بازار آمد.

گروه فرانک و کارو در همان دوران کارخانه‌ای در ایتالیا برپا داشت و چند سال پس از آن کارخانه‌های دیگر در کشورهای آلمان، ممالک متحده آمریکا، کانادا، نروژ و فرانسه تأسیس شدند. آنها در نزدیکی مراکز هیدرولیک ساخته شدند تا بتوانند از جریان برق برای کوره‌های قوسی تولیدکننده کاربرد استفاده کنند.

جزء سازنده دیگر، که نیتروژن است از هوا به دست می‌آید و اکسیژن باید حذف می‌شود. جذب اکسیژن هوا بوسیله مس گرم، کاری نسبتاً آسان بود، اما لازم بود که اکسید مس را با جریانی از گاز آب دارای خواص احیاکننده، بازیابی کرد. به علت هزینه گزاف و دشواری نسبی کل کار، تولید فراوان نیتروژن ممکن نبود.

سرانجام، بروش فیزیکی میعان هوا و سپس تقطیر جزء به جزء آن روی آوردند، زیرا از سال ۱۸۹۶ دستگاه لینه که کاربرد آن برای جدا کردن اکسیژن از نیتروژن، رواج روزافزونی داشت در دسترس بود. چند سال بعد، روش ژرژ کلود در اغلب جاها جانشین دستگاه لینه شد. مسائل دیگری که به بازده انرژی و تجهیزات دستگاه تقطیر جزء به جزء برای تهیه نیتروژن خالص ربط داشتند نیز باید حل می‌شدند.

روش جداسازی فیزیکی، گرچه با تولید نیتروژن دارای بیش از ۹۹/۵٪ خلوص به نیازهای تولیدی جدید پاسخ می‌داد، بعضی از صنعتگران، از جمله پولتسنیوس، بعدها برای اینکه نیتروژن دارای کیفیت برتر به دست آید، بروش شیمیایی روی آوردند. نوعی گاز پست با درصد کم اکسید کربن تهیه کردند و اسید کربنیک را با گذراندن آن از یک مایع قلیایی یا هوا، جذب کردند. برای تکمیل خلوص، آن را از محلول آمونیاکی کلرور کویورو گذرانیدند.

ترکیب سیانامید کلسیم به عنوان کود بازار گسترده‌ای به دست آورد اما رقابت کودهای شیمیایی دیگر، آن را محدود کرد. این ترکیب در نقش ماده خام برای تولید آمونیاک در اثر نیازهای شدید به آمونیاک در زمان جنگ جهانی اول، کاربرد وسیعی داشت. با این همه کارخانه‌های متعددی در جهان برای تولید این ترکیب، در چند سال پیش از آغاز جنگ، برای ساخت آماده بودند.

تثبیت نیتروژنی که با خلوص قابل قبول به دست آمده بود، روی کاربرد، کاری نسبتاً آسان بود. این عمل می‌بایست با کمک گرم کردن کاربرد در حدود ۷۰۰ درجه انجام می‌گرفت. سپس،

کار گرم کردن پایان می‌یافت و حرارت موجود، ادامهٔ واکنش را تأمین می‌کرد. برای تولید پیوسته یا همچنین گسستهٔ این ترکیب، راه‌حلهای گوناگونی وجود داشت که تفاوت اساسی آنها، در شکل کوره‌ها و تجهیزات لازم برای تأمین بهترین تماس کاربرد جامد و نیتروژن گازی بود. تجزیهٔ سیانامید کلسیم در آمونیاک، و کربنات کلسیم نیز با چند دستکاری در عمل برای تأثیر دادن آب در دمای مناسب روی سیانامید، با بازده بالا نیز آسان شده بود.

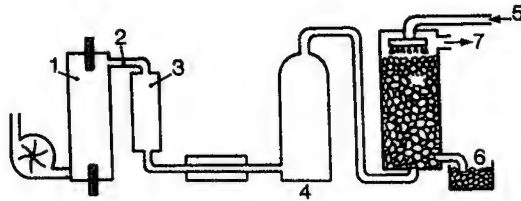
## اسید نیتریک سنتزی

### اکسایش نیتروژن

واکنش اکسایش نیتروژن تحت تأثیر جرقهٔ برقی از پایان سدهٔ هجدهم شناخته شده بود و حتی مادام لوفور فرانسوی در سال ۱۸۵۹ برای تولید اسید نیتریک آن را به ثبت داده بود. اما مرحلهٔ حقیقی این کار که به ساخت صنعتی آن کشیده شد تا دههٔ پایانی سدهٔ نوزدهم، آغاز نشد. بررسیهای آقایان ۱. پرو ساکن ژنو و مارسلن برتلو در گذشته نشان داده بودند که طول جرقه و بویژه توان آن، در بازده کار مؤثر می‌باشند.

آقای ف. ۱. گوی<sup>۱</sup> فیزیکیان ساکن ژنو در سالهای ۱۸۹۵ - ۱۸۹۶ همهٔ شرایط لازم را برای اینکه واکنش با بازده رضایتبخشی انجام شود تعیین کرده بود. این واکنش، از نوع اکسایش بسیار پیچیده‌ای است، زیرا نه تنها برگشت‌پذیری است، بلکه همچنین به این علت که نتیجهٔ واکنشهای تعادلی دیگری بین اکسیدهای گوناگون نیتروژن، اکسیژن و خود نیتروژن است. پس از گذشت بیش از ده سال از کارهای گوی و همکارانش، فیزیکیانان و شیمی‌دانان متعددی در باز کردن این کلاف سردرگم کوشیدند و حدود سالهای ۱۹۱۰ - ۱۹۱۳ بود که این پدیده کاملاً شناخته شد. در پرتو همین موج پژوهشی، واکنشهای نیتروژن با هیدروژن، و آمونیاک با اکسیژن نیز روشن شدند.

اما بسیار پیش از اینکه همه چیز در تئوری روشن گردد، امتیازهایی به ثبت رسید و کارهایی برای عملی کردن انجام گرفت. نخستین اطلاعات، حدود سال ۱۹۰۰ صنعتگران را راهنمایی می‌کرد که در کوره‌ای کم حجم کار کنند تا مخلوط گازی، در حقیقت، هوا، به‌طور یکنواخت به دماهای بالا ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه برسد، و بی‌درنگ گازها را در کورهٔ برقی به جریان اندازند تا هم جو کوره پیش از آنکه به حداکثر اکسیدهای نیتروژن، حدود ۵٪، برسد تجدید شده باشد و هم اینکه این اکسیدها تحت تأثیر تخلیهٔ برقی قرار نگیرند، زیرا اثر آن تجزیهٔ سریع این اکسیدهاست. گازهایی که در حال خروج از کوره هستند باید بی‌درنگ خنک شوند. تغییر شکل اکسیدها تا مرحلهٔ جذب آنها



شکل ۶۲. نمایه ساخت اسید نیتریک با اکسایش مستقیم نیتروژن.

کمپرسوری هوا را به درون کوره برقی ۱ می‌دمد. گازها با دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه خارج می‌شوند ۲. دیوکسید نیتروژن در ۳ تا ۵۰۰ درجه خنک می‌شود و در ۴ به پروکسید تبدیل می‌شود. گازها در یک برج جذب‌کننده بالا می‌روند و در رأس آن به جریان آب ۵ می‌رسند. اسید نیتریک در ۶ خنثی شده است. مانده گازی از ۷ فرار می‌کند.

در آب و تشکیل اسیدنیتریک پیش می‌رود (شکل ۶۲).

قوسهای دمیده برقی: نخستین واحد صنعتی در سال ۱۹۰۲ در ممالک متحده آمریکا در جرزی سیتی<sup>۱</sup> به‌توسط شرکت Atmospheric Products Co تألیس شد. این شرکت برای استفاده از حق امتیاز آقای برادلی و لاجوی<sup>۲</sup> تشکیل شده بود. این واکنش در یک کپسول استوانه‌ای انجام می‌گرفت که در داخل آن تعداد زیادی قوسهای کوچک برقی بین قطبهای پلاتینی ایجاد می‌شد. یکی از جدارهای دایره‌های دارای حرکتی گردشی نسبت به جدار دیگر بود تا مخلوط شدن گازها و قطبهای متعدد قوس تأمین شود این قدم اول، پیش‌سرس بود و توفیقی نیافت.

دیگر شرایط اساسی کاربرد قوس برقی در سالهای بعد، به توسط گوی در سویس و آقای بیرکلند در نروژ، مشخص شدند. این شرایط روشن ساختند که باید قوس را «دمید» تا همه حجم اطاق احتراق را فراگیرد. برای دمیدن به قوس از عبور ساده جریان گاز با سرعت زیاد استفاده شد. این راه‌حلی بود که در تأسیسات صنعتی سالهای ۱۹۵۰ و ۱۹۱۴ بوسیله شونهر برای BASF و پاولینگ برای شرکتهای آلمانی و اطریشی، و بویژه توسط روسی<sup>۳</sup> بعدها در ایتالیا به کار گرفته شد. این تنها روشی بود که در فرانسه توسط Société de l'Azote، تألیس در سال ۱۹۱۷، که تولید آن در سال ۱۹۲۰ به استفاده از کوره‌های پاولینگ به بازار آمد - به‌کار گرفته شد.

روش دیگری از دمیدن قوس، بوسیله فیزیکدان نروژی، بیرکلند از یک تجربه پلورک<sup>۴</sup> مربوط به سال ۱۸۶۱ اقتباس شده بود. این تجربه نشان داده بود که یک قوس برقی راستخط تحت تأثیر

۱. Jersey City: شهری در شمال شرقی ایالت نیوجرسی، مقابل منهاتن پایین - م.

2. Lovejoy 3. Rossi 4. Plücker

میدان مغناطیسی، به شکل مسطحی پهن می‌شود. بیرکلند این بررسی را در سال ۱۹۰۳، نخست در آزمایشگاه تکرار کرد. آقای اید<sup>۱</sup> یک صنعتگر و کاسب شهر کریستیان<sup>۲</sup> (اسلو) به بیرکلند، اندیشه به‌کار گرفتن این نوع قوس برقی را برای تحقق بخشیدن به اکسایش نیتروژن توصیه، و در همان زمان سرمایه شرکت نیتروژن نروژ را هم تأمین کرد.

این شرکت پس از آزمایشهای نیمه صنعتی، بین سالهای ۱۹۰۴ و ۱۹۱۰ در نروژ کارخانه‌های متعددی برپا داشت که از آن میان کارخانه نوتدن<sup>۳</sup> (۱۹۰۵) با ۲۵۰۰ اسب، نخستین کارخانه‌ای بود که فراورده خود را به بازار عرضه داشت. آقای اید برای تجهیزات مولد جریان سه فاز که یک توربین هیدرولیک از نوع پلتون محرک آن باشد به کارخانه آرلیکون مراجعه کرد؛ کارخانه هم، بی‌درنگ با BASF در آلمان و چند کارخانه دیگر در اروپا و آمریکای شمالی قرارداد بست.

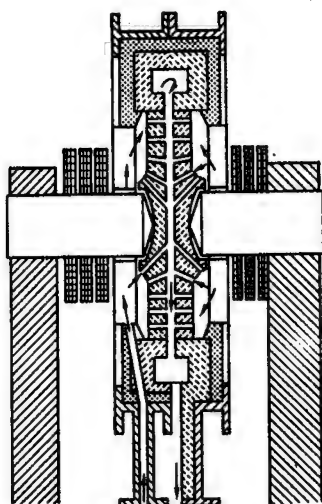
تجهیزات صنعتی: تجهیزات صنعتی این تولید در مرحله پس از کوره، عبارت بودند از وسایل میعان و تقطیر تدریجی هوا و نیز یک دم. در واقع پس از مدت کوتاهی از هوای غنی شده از اکسیژن برای افزایش بازده به شکل کیلووات ساعت انرژی مصرف شده، استفاده کردند. دم برای دمیدن سریع هوا در کوره لازم است. خود کوره به شکل استوانه‌ای با قطر زیاد بود، بسیار مسطح، که به‌طور عمودی روی لبه خود گذاشته می‌شد. روکش کوره، محتوی الکترودها بود. سرهای الکترودها با یکدیگر دومتر فاصله داشتند، آهنربای برقی و نوعی آستر نسوز که در آن فضاهای سوخت و کانالهای گردش گازها دیده می‌شوند (شکل ۶۳).

بقیه تجهیزات، بیشتر سیلفه‌ای بودند. برجهای خنک‌کننده، که تبدیل اکسیدها در آن انجام می‌گرفت، برجهای جذب بوسیله آب و احياناً ظرفهای خنثی‌کننده با آهک، که از وسایل سفالگری تکنیکهای کلاسیک شیمی صنعتی اقتباس شده بودند. در این مدار، در مخرج کوره یک دیگ بزرگ لوله‌ای گذاشته شده بود تا گرمایی که در تغلیظ محلولهای نیترات آهک از آنها استفاده شده بود بازیابی کند. دمهایی، هوای تازه را به برجهای خنک‌کننده و اکسایش می‌دمیدند.

در کوره‌های برقی وظیفه قوس برقی، تنها ایجاد دمای حدود ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه برای سوخت نیتروژن در سطحی حتی المقدور گسترده است. زمانی که این تأسیسات شروع به کار کردند، شماری از شیمیدانها در اندیشه ساختن کوره‌هایی برآمدند که با شعله غنی شده از اکسیژن خالص گرم می‌شوند.

چنین می‌نماید که این کارها از مرحله آزمایش فراتر نرفتند و صرفاً به‌عنوان شاهی از تلاش در توسعه این زمینه جدید امکانات وسایل صرفاً شیمیایی باقی مانده‌اند. باین‌همه، دیده شد که





شکل ۶۳. کورهٔ برقی بیرکلند - اید برای اکسایش نیتروژن.

برش جانبی کوره در سطح بخش قطبهای آهنربای برقی. قوس برقی در قسمت مرکزی تولید می‌شود. هوا از مجرای پایینی وارد کوره می‌شود و از هواکشهایی که در آسترنسوز کوره است می‌گذرد. هوای گرم از این هواکشها، وارد فضای احتراق می‌شود. مخلوط گازی شامل  $\text{NO}_2$  از مجرای مرکزی به طرف پایین رانده می‌شود.

در سالهای ۱۹۵۰ در ممالک متحدهٔ امریکا، روشی از گرم کردن با مصالح نسوز که از تکنیکهای کراکینگ نفت اقتباس شده بودند و دستیابی به دماهای لازم برای سوخت نیتروژن را میسر می‌ساختند در اوضاع و احوال تازه‌ای پدید آمدند.

در همهٔ انواع کوره‌های قوسی که برای اکسایش نیتروژن در بیست سال نخست سده بیستم اختراع شدند، کوره‌های بیرکلند و اید، بسیار کارآمدتر و رایجتر بودند. معاصران آنها از مشخصات تازهٔ یک کارخانهٔ تولید شیمیایی، بی‌سروصدا، تمیز و با تعداد بسیار کم کارگر شگفت‌زده شدند. تنها شکل باقی مانده این بود که در سطح تکنیکهای تولیدی و انتقال برق صنعتی در این دوران، برای اینکه تولید از جنبهٔ اقتصادی مناسب باشد، این کارخانه‌ها باید در نواحی دارای ذخایر انرژی هیدرولیک ساخته می‌شدند.

ظرفیت کارخانه‌های موجود، طی جنگ جهانی اول افزایش یافته بود و کارخانه‌های دیگری

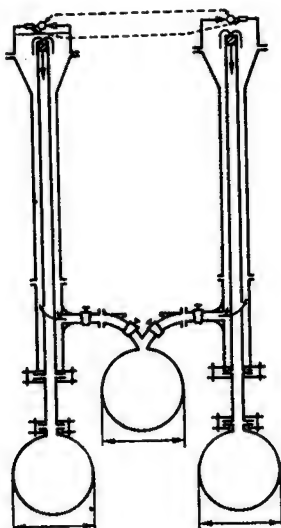
بویژه در سالهای ۱۹۱۷-۱۹۱۸ تأسیس شده بودند. پس از پایان پذیرفتن مخاصمات، روشهای گوناگونی به مدت پانزده سال تا اندازه‌ای رواج یافتند، اما روشهای اکسایش کاتالیزوری آمونیاک، که راه‌اندازی آنها تنها چند سال از روشهای اکسایش نیتروژن متأخرتر بودند، آنها را از میدان بیرون راندند.

### اکسایش آمونیاک

سوخت آمونیاک، از نظر درگیری و ادامه، واکنشی نسبتاً ساده است. ممکن است یا با ازت و آب انجام گیرد که هیچ سودی برای صنعت ندارد، یا در مجاورت کاتالیزور، و دمایی بالاتر از ۶۰۰ درجه با اکسید ازت و آب. اصول کار، همان‌طور که دیدیم، بوسیله فروریخ کولمن شرح داده شده است. آقایان اوستوالد و باوئر شیمیدانهای آلمانی در ۱۹۰۷ این اصول را دقیقاً تعیین کردند و در بسیاری از کشورها، جز آلمان که آنها را فاقد مشخصات نوآوری دانست، به ثبت رسانیدند. روش اوستوالد تقریباً بی‌درنگ در آلمان، در ناحیه گرت<sup>۱</sup> نزدیک بوخوم<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار گرفت، سپس مؤسسات متعددی از آلمان، انگلیس، بلژیک و امریکایی آن را به‌کار گرفتند. در فرانسه نخستین کارخانه، تا سال ۱۹۱۶ در آنگولم، برای کاربرد این روش تأسیس نشد و پس از پایان جنگ بود که تولیدی برابر با تولید گرت<sup>۱</sup> در ۱۹۰۹، حدود ۷۰ تن اسید نیتریک عرضه کرد.

پژوهشها از همان سالهای نخستین، در اطراف شکل و آرایش کاتالیزور پلاتینی به‌کار رفته تمرکز یافتند. اوستوالد از برگهای مسطح و موجدار که روی خود پیچیده شده بودند استفاده می‌کرد، شیمیدانهای دیگر توریهای پلاتینی، که بعداً باید نگاهداری می‌شدند، به‌کار می‌بردند. مسأله، به‌دست آوردن بهترین بازده و بویژه تولید هرچه بیشتر با پلاتین ثابت بود. راه‌حلهای گوناگونی برای شکل فضاهای سوخت، مدخل، گذرگاه و نیز اصلاح گازها پیشنهاد شدند.

کنورتیسور اصلی اوستوالد از یک لوله باریک و دراز نیکلی تشکیل می‌شد که درون یک لوله چدنی لعبی گذاشته می‌شد. مخلوط آمونیاک و هوا وارد قاعده لوله حلقه‌ای می‌شد و در تماس با لوله نیکلی که گازها پس از واکنش، در آن پایین می‌آمدند گرم می‌گردید. در انتهای فوقانی کنورتیسور، مخلوط گازی از روی کاتالیزور گرم می‌گذشت و سوخت آمونیاک در یک‌دهم ثانیه عملی می‌شد. درگیری واکنش در لحظه راه انداختن، با گرم کردن کاتالیزور به توسط یک مشعل هیدروژن یا گاز روشنایی ایجاد می‌شد (شکل ۶۴). گرچه اشکال گوناگون کنورتیسور بی‌درنگ طرح شدند که بویژه دارای فضاهای واکنش بسیار وسیع بودند، طریقه درگیری واکنش در همه این سیستمها یکی



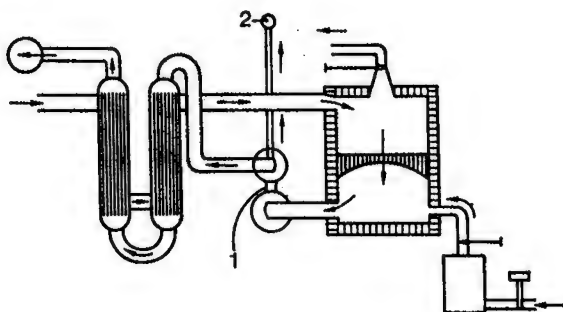
شکل ۶۴. کنورتیسور اوستوالد؛ برای اکسایش آمونیاک در اسید نیتریک  
دستگاه دو فضای احتراق عمودی دارد که به توسط مجرایی که مقطع آن در مرکز شکل دیده می شود با مخلوط گازی (آمونیاک و هوا) تغذیه می شوند. گازها با بالا رفتن در قسمت حلقوی هر ستون، گرم می شوند. در نوک ستون با گذشتن از روی کاتالیزور، وارد قسمت میانی می شوند و برای اینکه از مجراهای واقع در پایین بگذرند، پایین می آیند.

بود و گرم کردن با برق، زیاد رضایتبخش نبود.

یک کارخانه شامل، نخست یک واحد تهیه آمونیاک گازی است که ماده خام آن، سولفات آمونیم، سیانامید کلسیمی  $\text{Ca:N. CN}$  یا یک محلول آمونیاکی ساده است. بخش اصلی این واحد، ستونی با بشقابکهاست که از بالای آن آمونیاک گازی که در یک مخزن گاز، با هوا مخلوط شده است، خارج می شود.

بخارهای نیترو پس از عبور از کنورتیسور از تعدادی برجهای اکسایش و جذب، مشابه برجهای کارخانه های نروژی اکسایش نیتروژن، می گذشتند.

عملی کردن روش: این روش جدید تهیه اکسیدهای نیتروژن، گویا نخست برای تولید بخارهای نیترو مورد نیاز اطاقهای سربی به کار گرفته شد. اما برای تهیه اسید نیتریک لازم جهت نیتروژدهی به هیدروکربنهای حلقه ای، نخست جهت ساخت رنگهای مصنوعی، سپس، اندکی بعد به علت



شکل ۶۵. کنورتیسور BASF برای اکسایش آمونیاک به اسید نیتریک.

مخلوط گازی (آمونیاک + هوا)، پیش از آنکه به فضای اکسایش (طرف راست شکل) برسد، متحمل دو تبادلگر حرارتی می‌شود. از همان آغاز عملیات، بوسیله کوره‌ای که گاز پست می‌سوزاند، فضای اکسایش گرم می‌شود (طرف راست و پایین). گازها در کنورتیسور، از بالا به پایین از روی کاتالیزور می‌گذرند و پس از عبور از یک دیگ لوله‌ای ۱ که ۱۲ کیلوگرم بخار آب تولید می‌کند (شروع حرکت از ۲)، خارج می‌شوند، در پایان از دومین لوله‌های تبادلگرهای گرمایی می‌گذرند.

جنگهای زیردریایی، برای ساخت مواد منفجره، در اندیشه شدند. لازم بود که اسید نیتریک تولیدی با ۴۵ تا ۵۰٪ اسید را برای اینکه به ۸۵٪ و بیشتر برسد، تغلیظ کرد. این کار با مخلوط کردن اسید رقیق با اسید سولفوریک انجام می‌گیرد، که آب خود را به هنگام تقطیر حفظ می‌کند. این یک روش کلاسیکی است که مؤسسات متعددی برای آن راه‌حلهای گوناگون یافتند و بعضی از آنها غلظت را به ۹۹/۵٪ رسانیدند.

آمونیاک که در اواسط نخستین جنگ نسبتاً فراوان شده بود به فراورده اصلی ساخت اسید نیتریک ضرور جهت تولید مواد منفجره تبدیل شد. در چنین اوضاع و احوالی است که اصلاحات در روش اوستوالد و پژوهش برای یافتن روشهای گوناگون بشدت رواج یافت. آلمانیها بیشترین سهم را در این فعالیت دارند و در امریکا آقای چارلز ل. پارسنز بعد از سال ۱۹۱۶ اقدام کرد.

در آلمان روش اصیل بوسیله BASF و در کارخانه اوپاتو<sup>۱</sup> انجام می‌گرفت. در این کارخانه سنتر آمونیاک با روش فریتس هابر از سال ۱۹۱۴ عمل می‌شد (شکل ۶۵). مهندسان بادیش آنیلین اوند زودا فابریک به مدیریت آقای الوین میتاش<sup>۲</sup>، حدود سال ۱۹۱۵ توانستند به جای پلاتین از اکسید آهن همراه با اکسیدهای دیگر فلزی به عنوان کاتالیزور استفاده کنند. گروههای پژوهشی این

مؤسسه تجربه بسیاری در این کار از روبراه کردن ساخت اسیدسولفوریک مجاورتی به دست آوردند و برای یکبار دیگر برتری خود را بر همه گروههای دیگر فیزیکوشیمییدانهای صنعتی سراسر جهان ثابت کردند. تجهیزات کامل تنها در سال ۱۹۱۸ به طور قطعی به مرحله تولید رسید. اصول طرز کار این دستگاه و نیز ساختار آن بسیار متفاوت از کنورتیسور اوستوالد بود. هر واحد می توانست ۱۲۰ تن آمونیاک در هر روز تولید کند.

در فرانسه دورنمای ساخت اسید نیتریک با اکسایش آمونیاک، با گذشت مدت زیادی از آغاز جنگ مطرح شد. بررسیهای این کار به عهده آقایان پل پاسکال و دوکاریر<sup>۱</sup> شیمیدان گذاشته شد. این بررسیها به اطلاع همه جانبه ای از واکنشها و شرایط لازم برای اینکه سوخت آمونیاک در مقیاس صنعتی انجام گیرد انجامید. اما راه حل عملی نوینی یافت نشد، بنابراین کار خود را متوجه تأسیس کارخانه ای در آنگولم کردند که نسخه بدل کارخانه ویلورده<sup>۲</sup> بلژیک با همان ظرفیت تولیدی کم بود. پس از اینکه مرحله بحرانی جنگهای زیردریایی به پایان رسید گویا فرانسه روی آینده خوش مخازن نیترات شیلی حساب می کرد و به کارخانه آنگولم به چشم یک مسکن می نگریست. انتظار سود اقتصادی از این روش نداشتند.

افزایش تولید کارخانه های موجود برای سال ۱۹۱۸ از همان پایان جنگ، قطع شد. زمانی که کارشناسان متفقین، کارخانه های آلمان را بازرسی کردند از اهمیت تجهیزات و ظرفیت تولیدی آنها شگفت زده شدند. آقای لویی هاکسپیل<sup>۳</sup> در ۱۹۲۲ در شرح کارخانه های BASF می نویسد: «کارخانه آپاتو بدین ترتیب می تواند تقریباً همه آمونیاک تولیدی خود را به اسید نیتریک تبدیل کند، کاری که تنها با آغاز جنگ جدیدی لازم است به آن دست یازد».

در واقع در طی دهه پیش از جنگ جهانی دوم است که روشهای سنتی به کناری گذاشته شدند و این صنعت آغاز به ساخت تقریباً انحصاری اسید نیتریک با روش اکسایش آمونیاک پرداخت و علت آن علاوه بر پایان پذیرفتن تدریجی رگه های نیترات طبیعی، به کار افتادن واحدهای تولیدی آمونیاک سنتزی بود.

آمونیاک سنتزی فراورده ای بود که از ناخالصیهای ارسنیک و گوگردی فارغ بود. ناخالصیهای که کاتالیزورگرها را، در زمانی که جز آمونیاک تهیه شده با روشهای شیمیایی در دسترس نبود، «مسموم» می کردند. اما عوامل دیگری نیز به سود این روش تولید بودند. طی سالهای ۱۹۲۵ - ۱۹۳۰ متالورژی توانست فولادهای مقاوم در برابر بخارهای نیترو بسازد. در این زمان توانستند واحدهایی برای تبدیل و جذب بسازند که تحت فشارهای چندین اتمسفر کار می کردند. این واحدها، نخست در ممالک

متحدۀ امریکا (دوپون دونمور)، سپس در ایتالیا تأسیس شدند. آنها اسیدهایی با غلظتهای ۶۰ تا ۷۰٪ تولید کردند.

بعدها، تولید آمونیاک سنتزی از تولید اسید نیتریک جدا شد. در واقع تحویل آمونیاک مایع به مشتریان برای اینکه آن را به اسید تبدیل کنند بیشتر به صرفه نزدیک بود تا اینکه آن را به کار بردند. این پراتیک، راکد گذاشتن سرمایه‌های بزرگ به شکل ظرفهای ساخته شده از فولاد رنگ نزن را بی‌مورد می‌کرد و از فولادهای معمولی برای حمل آمونیاک استفاده شد.

### سنتز صنعتی آمونیاک

دیده شد که بررسی ترکیب نیتروژن با هیدروژن در تمام سالهای نخستین سده بیستم، در زمرۀ کارهای اولیه بزرگ فیزیکوشیمی بود و به طرح یک روش بدیع ساخت صنعتی انجامید. این کارها در یک رشته پژوهشهایی از همین نوع، که راه را برای روشهای نوین تولید آمونیاک و اسید نیتریک (همان‌طورکه شرح داده شد)، هموار کردند، مؤثر بودند. اما سنتز آمونیاک، تا چند سال بعد وارد مرحله صنعتی نشد. تنها مشکل تحریک واکنشها در فاز گازی مطرح نبود، بلکه ترکیب کردن دو گاز: نیتروژن و هیدروژن، در فشار بالا، با دوباره به گردش در آوردن این مخلوط گازی در سراسر کاتالیزور، در فضای واکنش و با حذف بخشی که در هر گردش ترکیب می‌شد، نیز در میان بود. دشواری در کار و وسایل: در پایه‌گذاری این روش، با دشواریهای کاملاً جدیدی از لحاظ کار و وسایل برخورد کردند: نخستین تجهیزات صنعتی ویژه این روش در ۱۹۱۳ شروع، و در سالهای بعد در کارخانه آپاتو متعلق به BASF تکمیل شد، محققاً نخستین نمونه یک صنعت مهندسی نوین شیمی است.

مجادلات میان آقایان والترنست و فریتس هابر در سالهای ۱۹۰۳ تا ۱۹۰۵ به سود هابر تمام شد و شخص اخیر شرایط نظری این روش را که توانست با پشتیبانی مالی BASF عملی کند و آن را در ۱۹۰۸ به ثبت برساند، تعیین کرد. پایه این روش به گردش در آوردن مخلوط نیتروژن و هیدروژن با درصد مناسب و نگاهداری آنها در زیر فشار ۲۰۰ اتمسفر در محفظۀ استوانه‌ای واکنش، محتوی کاتالیزوری از آهن بود که بشیوۀ خاصی آن را آماده کرده بودند. بهینه دمای واکنش در چنین فشاری باید بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه باشد. جریان گاز تحت فشار باید سریعاً به سوی بخشی از تأبنیسات با دمای کم هدایت شود و در آنجا، آمونیاک به شکل محلول آبی جدا می‌شود. چون بازده این واکنش کاتالیزوری از ۴ تا ۵٪ بیشتر نیست برای اینکه اتلاف جرم گاز ترکیب نشده

زیاد نباشد باید آن را به طور پیوسته از محفظه واکنش عبور داد و در هر عبور کمبود مربوط به حذف شدن آمونیاک تشکیل یافته را جبران کرد. بدین ترتیب، باید تجهیزات بسیار حجیمی طرح می شد که دارای تبادلگرهای طویل حرارتی، گازهای گرم و گازهای سرد دارای گردش مخالف یکدیگر در لوله های هم مرکز باشند. این شرایط ظاهراً نسبتاً ساده هستند اما تحقق آنها با دشواریهای فراوان برخورد دارد: تهیه نیتروژن و هیدروژن خالص با بهای اقتصادی، حمایت از فلزاتی که در اثر هیدروژن دارای دمای بیش از ۴۰۰ متخلخل شده اند، به گردش در آوردن گازها با سرعت ثابت، آب بندی کردن اتصالات، بازیابی فرآورده های جانبی و مقدار انرژی از بین رفته در بعضی از مراحل تولیدی. طرح این مدار تولیدی و ساخت وسایل در اندازه بزرگ برای کارخانه آپاتو، که بوسیله BASF در نزدیکی لودویگهاfen انجام گرفت، از سال ۱۹۱۲ زیر نظر کارل بوش<sup>۱</sup> بود. آقای بوش با تغییر نقطه نظر سنتی صنعتگران، از شیمی کلاسیک متمرکز عمودی عملیات گوناگون، از مرحله به کارگیری مواد خام تا به دست آمدن فرآورده های تمام شده، با پرهیز از اتلاف فرآورده های جانبی و هزینه انرژی، حلقه نخستین زنجیره کار خود را، ساخت کوره کک سوز معین کرد. زغال تنها ماده وارد به کارخانه، بود نیتروژن از هوا گرفته می شد و هیدروژن از آب رودخانه راین.

چرخه آلمانی تولید: این کوره ها ککی تولید می کردند که برای تهیه این مخلوط گازی و گازهای سوختی مناسب بود. گازهای سوختی در موتورهای گازی به کار می رفتند که به طور قطعی جانشین ماشینهای بخار برای کار کمپرسورها و تلمبه ها شدند.

گازسازهای ککی، مخلوطی از گاز آب: اکسید کربن و هیدروژن، و گاز ضعیف یا گاز هوا، اکسید کربن و نیتروژن تهیه می کردند. وانگهی این مخلوط، درصد کمی هم گاز کربنیک داشت. این مخلوط تصفیه می شد و با گذراندن بخار آب در مجاورت کاتالیزوری که CO را به CO<sub>2</sub> تبدیل می کرد، آن را مناسب می ساختند. بعد، پس از تحت فشار قراردادن اولیه تا ۲۵ اتمسفر، انحلال گاز کربنیک در آب در یک ستون جذب انجام می گرفت.

در همین مرحله، دو کار همزمان، بازیابی فرآورده های جنبی و انرژی را میسر می ساخت. جریان قوی آب که از ستون جذب خارج می شد توربین پلتون را می گردانید. این توربین حدود ۶۰٪ انرژی را که برای تغذیه برج جذب مصرف شده بود، از نو به کار می گرفت. مرحله رفع فشار، گاز کربنیک را آزاد می کرد و این گاز کربنیک به واحد تولید کربنات دوسود هدایت می شد.

مخلوط نیتروژن - هیدروژن را بعداً مرحله به مرحله تا ۲۰۰ اتمسفر، تحت فشار قرار می دادند. سپس آن را با یک روش شیمیایی، کاملاً خالص می کردند. با این روش مقدار CO که به CO<sub>2</sub>

تبدیل نشده بود حذف می‌شد. در سالهای پایانی جنگ، مقدار CO به‌دست آمده برای تولید اکسی‌کلرورکربن  $\text{COCl}_2$  به‌کار گرفته شد. محصول اخیر، همان فسژن گاز جنگی بسیار کشنده است. این گازها را سرانجام وارد مدار سنتز می‌کردند. در این مدار متحمل سه تبادل گرمایی و فضای واکنش، که مجهز به کاتالیزور بود می‌شدند (شکل ۶۶). جدار بیرونی این اتاق سوراخهایی داشت تا گردش یک پوشش نیتروژنی، که فلز را از آسیب هیدروژن حفظ می‌کند، ممکن باشد. این گازها با طی مسیری برخلاف مدار تبادلگرها، وارد دستگاههای میعان‌کننده می‌شوند تا آمونیاک تشکیل شده جذب شود.

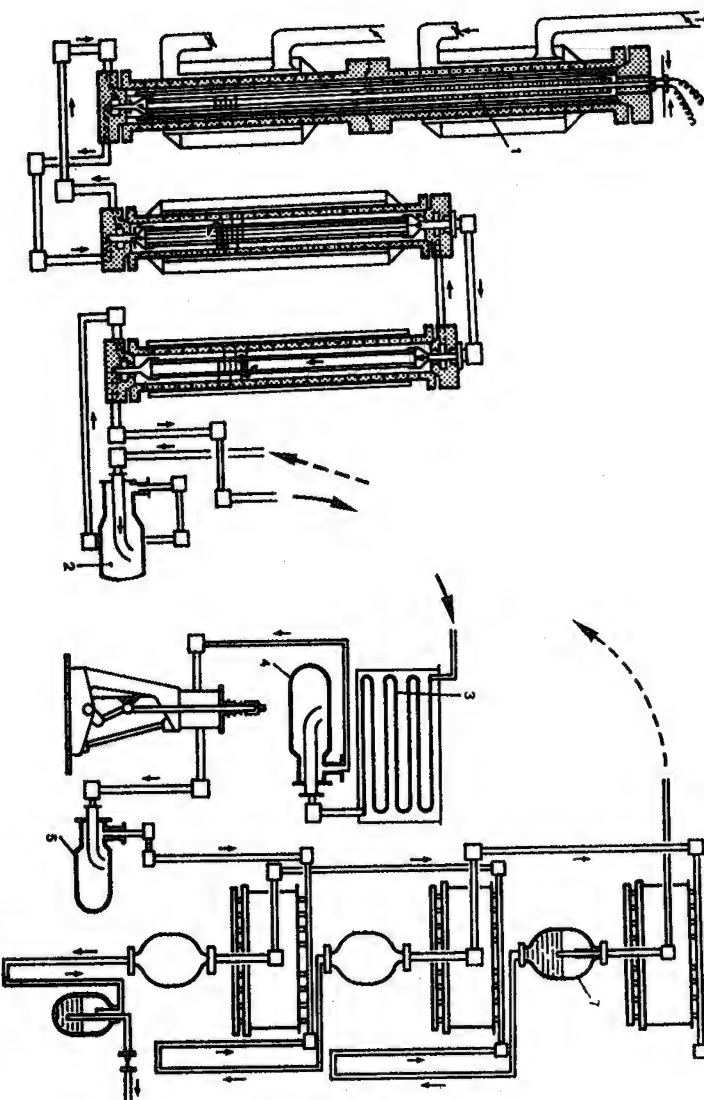
بخشهای اخیر مدار، هنوز برای تولید در دسرهای فراوان دارند. این گازها در فشاری چنین بالا، ویسکوزیته‌ای دارند که مانع جریان آنها در ماریجهای تنگ و طولی می‌شوند که باید برخلاف جهت هوا از آنها بگذرند. آقای بوش و همکارانش این مسأله را با روی هم گذاشتن سه واحد میعان، که هر کدام با یک بطری جداسازی گازها از آب مجهز بودند، حل کردند. هر کدام از این واحدها به‌طور جداگانه، در جهت مدار خاص خود وارد طبقه بعدی می‌شد. از بالای طبقه آخر، مخلوط نیتروژن - هیدروژن ترکیب نشده به مدار کاتالیز بازگردانیده می‌شد.

زمانی که کارخانه آپاتو تولید آمونیاک خود را در سال ۱۹۱۳ آغاز کرده بود مجموعه تجهیزات و وسایل، هنوز به این درجه از کمال نرسیده بودند. تنها در سالهای بعد، طبعاً با مخفی کاری بسیار، این مجموعه کمال یافت. زمانی که شیمیدانهای کشورهای متفق، پس از متارکه سال ۱۹۱۸، این کارخانه را دیدند در برابر برتریهای مهندسان آلمان غرق حیرت شدند. چنین احساسی بعدها به همه کارشناسان جهان دست داد. می‌توان چنین اندیشید که این کار حیرت‌انگیز BASF نفسی تاریخی در تغییر مسیر تکنیکهای شیمی صنعتی داشته است.

تولیدهای کوچک در خارج: در خارج آلمان دانشمندان فیزیکوشیمی در این دوران بسیار معدود بودند و از سوی دیگر، مدیران صنایع به اندازه آلمانیها از آنان پشتیبانی نمی‌کردند. آنان در شروع جنگ اطلاعات چندانی از روش هابر، جز یک گزارش که وی در ۱۹۱۰ تنظیم کرده و در ۱۹۱۳ انتشار داده بود، نداشتند. همچنین، شیمی‌دانانی که به‌هنگام جنگ در فرانسه، ایتالیا، سوئیس، انگلستان و ممالک متحده آمریکا این مسأله را مورد بررسی قرار داده بودند، با اینکه یکی از نخستین همکاران هابر در زمان بررسیهای نظری وی، آقای لو روسیگنول<sup>۱</sup> انگلیسی بود، به هیچ‌گونه نتیجه مشخصی نرسیدند. کار پیشرفته‌ای که از روش BASF بسیار متفاوت بود مربوط به جنرال کمیکال کمپانی ممالک متحده آمریکا می‌شد که در ماه ژوئن ۱۹۱۸ در شفیلد (آلاباما) کارخانه‌ای برپا داشت که

1. Le Rossignol





شکل ۶۶: تأسیسات BASF برای ستر آمونیاک.

گردش گازها در مدار بسته. سمت چپ، محوطه کاتالیز ۱، که بر روی یک وسیله انشعابی قرار دارد تا واکنش آغاز شود. گازها با گذشتن از بطری جداسازی آب ۲ و سه تبادلگر حرارتی، به باتریهای جذب (سمت راست شکل)، می‌رسند. آنها پس از واکنش، در سراسر تبادلگرها پخش می‌شوند، از خشک‌کننده ۳، جداکننده آب ۴، تخلیه‌گردش‌دهنده، جداکننده آب از روغن ۵، می‌گذرند، و وارد باتری جذب (در سمت راست نمایه آن آمده است) می‌شوند. در هر طبقه از گردش گازها از پایین به بالا، آب از ۶ از بالا به پایین وارد می‌شود. در بالای هر طبقه، آب گازها را به دون مارپیچی وارد می‌کند و در یک بطری جداسازی ۷، جریان می‌یابد. گازها حرکت رو به بالا و آب آمونیاک حرکت رو به پایین را شروع می‌کنند.

در ماه نوامبر در هر روز بیش از هفت تن آمونیاک محصول نداشت، درحالی که در همان زمان هر دو کارخانه BASF در سال صد هزار تن تولید داشتند. کارخانه شفیلد در ژانویه ۱۹۱۹ تعطیل شد. سنتز در فشار بالا: اما کوششی، در ابتدا منفرد، از آقای ژرژ کلود در فرانسه، آینده‌ای بسیار درخشان داشت، و از روش هابر هم ساده‌تر بود. در سالهای ۱۹۱۷-۱۹۱۸ زمانی که شیمیدانهای رسمی فرانسه، بیرون از مدارهای صنعتی با بی‌تفاوتی کار می‌کردند، با تحمل مرارت کوشیدند تا کارخانه‌ای آزمایشی در یکی از دانشگاههای پاریس بسازند. آقای ژرژ کلود با منابع شرکت Air liquide خود در کارخانه خود Grande Paroisse واقع در مونتره<sup>۱</sup>، نخستین وسایل سنتز کاتالیزوری آمونیاک با فشار ۱۰۰۰ اتمسفر را ساخت.

آقای کلود با کار کردن در چنین فشار بالا و در کوشش برای حفظ دمای واکنش در مرزهای مناسب، اندیشید که می‌تواند بازدهی ده برابر هابر به‌دست آورد. اما امکانات ساخت وسایل صنعتی قادر به تحمل فشارهایی تا این حد، در محافل فیزیکدانان با بدبینی زیاد مواجه بود. نخستین کوششها در اواخر سال ۱۹۱۷ در بولونی به‌عمل آمد و نشان داد که دشواریهایی فنی را می‌توان آسان برطرف ساخت. حجم گاز مورد عمل از روش هابر، پنج بار کمتر بود، زیرا در فشارهای بالا، مجموعه وسایل حجم بسیار کمتری دارند و دشواریهای مربوط به مقاومت و آب‌بندی وسایل، علی‌رغم ظاهر کار، آسان برطرف شدند. همچنین حمایت از خوردگی فلز بوسیله هیدروژن، با کاربرد فولادهای ویژه، علی‌رغم بهای بالای آنها - به علت کمی مصرف - امکان داشت.

تلاش در مونتره ادامه یافت، زیرا در این کارخانه که برای پاسخگویی به نیازهای جنگی تجهیز شده بود، کالر را با الکترولیز کلرورسدیم می‌ساختند. بنابراین آقای کلود منبعی از هیدروژن خالص در اختیار داشت و پس از مدت زیاد به رفع مشکل تهیه آن، جهت کاربرد، در سنتز آمونیاک با روش شخصی خود، موفق شد.

برتریهای دیگر روش کلود در اندک مدتی نمایان گردید. می‌توانستند از گردش پیوسته مخلوط نیتروژن - هیدروژن، به علت بازده بالای واکنش، در گذر از روی کاتالیزورگر، صرف‌نظر کنند. گازهای ترکیب ناشده به واحد دوم و سپس سوم کاتالیز فرستاده می‌شدند و گردش آنها بدون یاری کمپرسور بود، و تنها، دتانتی که محدوده به انتقال از یک واحد به دیگری بود برای این کار کفایت می‌کرد.

چون مقدار انرژی لازم برای ایجاد یک فشار اولیه ۱۰۰۰ اتمسفر، خیلی زیادتر از انرژی لازم برای ۲۰۰ اتمسفر نیست ترازنامه انرژی عملیات در پایان کار بهتر است. سرانجام، کار در فشارهای بسیار بالا سبب خواهد شد که آمونیاک مایع خالص و بدون آب به‌دست آید.

یک شرکت صنعتی جدید در سال ۱۹۱۹ با شرکت سن‌گوین و آریلیکید تشکیل شد تا آزمایشهای با حجم متوسطی در تأسیسات صنعتی انجام دهد. مرحلهٔ اخیر سه سال بعد در کارخانه مونترو عملی شد. مشکلات فنی جدید نیز برطرف شدند: افزایش حجم فضای کاتالیز از ۱۵۰ به ۱۴۰۰۰ سانتیمتر مکعب؛ خنک کردن وسایل با گردش سرب مذاب؛ حمایت در برابر خطرات انفجاری با سبتر و پرکردن دیوارهای بتونی.

فلسفهٔ کلی این روش نیز با روش آلمانی متفاوت بود. آقای کلود به‌جای سانترال‌های حجیم و کاملاً جدا، روش واحدهای نسبتاً سبک را در پیش گرفت، که می‌توانست آنها را در تأسیسات متالورژیکی، که در سایهٔ گازهای کک‌پزی، دارای هم ذخایر فراوان توان حرکت دهندگی و هم منبع هیدروژن هستند، به‌طور کامل جای دهد. کلود طبعاً روش تهیهٔ هیدروژن را با روشی که ویژگی آن، مایع کردن گازهای کوره‌های پخت کک، سپس تقطیر جزء به جزء آنها بود پایه‌گذاری کرد.

وی بدین ترتیب صنعت آمونیاک سنتزی را به مقتضای شرایط محلی می‌نگریست که منابع صنعتی و تولید سولفات آمونیم در کنار مناطق کاربرد آنها برای کشاورزی باید باشند. دلواپسی تهیهٔ نیترات طبیعی که به‌طور قطعی فراموش شده بود؛ در فرانسه باز تنها به تثبیت نیتروژن هوا فکر می‌کردند که می‌توانست پس از مدت کوتاهی، بتنهایی منبع مادهٔ اولیه برای ساخت اسید نیتریک تبدیل شود.

یک مقطع تاریخی: در برابر این دید کلی تفن‌گرایی صنعتگران فرانسه و تقریباً همهٔ کشورهای دیگر، نسبت به تکنیکهای شیمیایی تازهٔ ناشی از تلاشهای زمان جنگ، رفتار صاحبان صنایع آلمان، بسیار واقع‌گرایانه‌تر بود و نشانی از توجه به‌کاری بود که شده است و چشم‌اندازی که باید مورد استفاده قرارگیرد. دوازده روز پس از متارکهٔ جنگ، در زمانی دارای ابهام سیاسی بسیار، در آلمان مؤسسات بزرگ شیمی و خود دولت، مشترکاً مؤسسه Stickstoff Gesellschaft را تشکیل دادند که نمایندگی فروش سراسری ترکیبات نیتروژنی ویژهٔ کشاورزی را برعهده داشت. در ماههای پایانی جنگ، تولید اسید نیتریک در آلمان بیش از نیازهای جنگی و کشاورزی آن بود. مؤسسه BASF کمی پس از پایان مخاصمات، پیشنهاد کرد که تولید سالانهٔ آمونیاک سنتزی خود را سه برابر کند. آقای لویی هاکسپیل، شیمیدان فرانسه در ۱۹۲۲ حساب کرد که مقدار سولفات آمونیمی که طی سه سال طبق معاهدهٔ ورسای به فرانسه، که از کمبود مداوم کود نیتروژنی رنج می‌برد داده شده است، تنها تولید یک هفتهٔ بادیش آنیلین اوند زودا فابریک را تشکیل می‌دهد.

این تهور در طرحها، ساختها و هدفهای صنایع شیمیایی آلمان در برههٔ ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰، در

روند تاریخی سبب شد که تکنیکهای تولید در مرحله‌ای از تحول به مسیری وارد شود که در آغاز سده، تصور آن هم ممکن نبود. این مقطع تاریخی، نتیجه اوضاع و احوالی است که در جریان جنگ جهانی دوم و در سالهای پس از آن وجود داشته است. اما با پایان جنگ که برای آلمان بسیار فاجعه‌آمیز بود، این صنایع شیمی ممالک متحده امریکا هستند که نقش پیشگامی قطعی را بر دوش دارند.

### تحول و گوناگونی روشها

روشهای اصیل تثبیت نیتروژن بزودی به گوناگونی کشیده شدند. تاریخ میل دارد تنها به روشهایی بپردازد که به نخستین کاربرد صنعتی راه یافته‌اند و آنها را به مشهورترین کسانی که در این راه کوشیده‌اند، نسبت دهد. اما، در واقع صنعتگران متعدد، شرکتها یا افرادی، انواعی از روشهای نخستین را اصلاح می‌کنند و حتی روشهای گوناگونی را با هم تلفیق می‌کنند و از هر روش، بخشی را که به نظر بهتر و ساخت آن آسانتر و بازده آن بیشتر و هزینه تولیدی کمتری دارد برمی‌گزینند.

عوامل تحول: در مورد مصالح، وسایل و طرز کار، چه برای تبدیل سیانامید به آمونیاک، و چه برای سنتز آمونیاک و بالاخره جهت اکسایش آمونیاک و سرانجام جذب بخارهای نیترو و میعان اسید نیتریک به دست آمده، همان حالات بالا وجود داشته است. چیزی که در این تحول می‌توان گفت، سرعت چشمگیر آن است. گرچه صنعت سنتی نیتروژن مدتها پابرجا ماند، بی‌شبهه این صنعت جدید، تکنسین‌های متعددی را شیفته خود کرده بود. اگر به گذشته نگاه کنیم می‌توان گفت که عدم اعتماد و ناستواری نسبی منابع طبیعی، همچون محرکهایی برفع تثبیت مستقیم عمل کرده‌اند. آقای پل پاسکال، شیمیدان فرانسوی در سال ۱۹۳۰ درباره ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلیون دهان باز پرسش می‌کند «که می‌توانند این تغذیه ویژه را یکی از دلایل برتریهای اخلاقی و سیاسی به‌شمار آورند»، زیرا شمار مصرف‌کنندگان با سرعتی بیش از پهنه‌های کشت شده افزایش می‌یابد و نیز همه زمینهای مستعد کشت غلات، بزودی زیر کشت خواهند رفت و بنابراین بهبود خاک با ترکیبات نیتروژنی ناگزیر خواهد شد.

تردیدی نیست که چنین تأملاتی در سالهای ۱۹۳۰ وجود داشته است. در همان زمان کارشناسان دیگری این دلواپسی را داشتند که اگر مصرف فراورده‌های نفتی از نظر تناوب تغییر نکند، به گمان این کارشناسان، ذخایر جهانی نفت طی سی سال پایان می‌پذیرد. دغدغه این کمبود، آشکارا یک واکنش طبیعی انسان در برابر افراط‌گرایی است. جای تردید است که مخترعان دهه نخست

سده، خواسته‌اند به بشریتی که در برابر کمبود احتمالی فراورده‌های نیروژن طبیعی قرار دارد، داری آرام‌بخشی ارائه کرده باشند.

تردیدی نیست که این کسان را روح مقابله با مشکلات به میدان آورده است و رضامندی از ساختن یک کار شخصی، بیشتر آنها را تشویق می‌کرد تا احتمال سود اقتصادی. مطالب بالا بقدر کافی کوششهایی را که برای تطبیق روشها و بویژه برای دگرگون ساختن امتیازها انجام گرفته است، توضیح می‌دهد. این نوع رفتار، پدیده تازه‌ای هم نیست، اما از این دید، اهمیت دارد که بسیار سریع به زمینه‌ای روی آورد که کشف آن بسیار تازه بود و بنابراین دورنماهای سودآوری آن، اگر نیازهای جنگی با چنان ابهتی پیش نمی‌آمدند، اطمینان‌بخش نبودند.

درباره این گوناگونی که بسیار سریع در روشهای اصیل پدید آمدند، تنها به نشان دادن چند نمونه بسنده می‌کنیم.

درباره آمونیاک سنتزی، در سالهای جنگ، تأسیس کارخانه آپاتو، سپس مرزبورگ<sup>۱</sup> طبعاً دستخوش اصلاحات پیاپی بوده‌اند. تهیه مخلوط گازی و خالص کردن آن، ترتیب واحدهای کاتالیز، وسایل جذب، راه‌حلهای گوناگونی را مطرح ساختند. اما این اصلاحات به‌هیچ‌وجه اقتصاد کلی روش هابر را آشفته نکرد.

سنتز آمونیاک در فشارهای متفاوت: پس از جنگ جهانی اول، روشهای دیگر سنتز آمونیاک در حدود سال ۱۹۲۰ پدید آمدند. روش ژرژ کلود که قبلاً توضیح داده شد، افکار را هیجان‌زده کرد، زیرا برپایه راه‌حلهای بسیار زیبایی قرار داشت. خود اصطلاح فرفشار hyperpression، که وی به‌کار گرفته بود نشانی از این زیبایی است. روش وی صنعتگران دیگری را برانگیخت تا از فشارهای بسیار بالاتر از فشاری که آقای هابر به‌کار برده استفاده کنند، و باین‌همه فشار مورد استفاده آنها از فشار کلود کمتر بود. آقای کساله<sup>۲</sup> صنعتگر ایتالیایی، روشی را در سال ۱۹۱۸ به ثبت رسانید که در آن، هیدروژن در اثر گرمای برق، در فشار ۶۰۰ تا ۸۰۰ اتمسفر در هوا می‌سوخت. کاربرد این روش در ۱۹۲۲ آغاز شد و چند سال پس از آن، در فرانسه تأسیساتی از این نوع با ظرفیت بسیار بیشتر از ظرفیت کارخانه‌های نوع کلود، برپا شدند.

روشهای دیگری، از جمله، روشهای: فوسر<sup>۳</sup> در ایتالیا و Nitrogen Engineering Co در ممالک متحده آمریکا بروش BASF نزدیک بودند و از فشاری حدود ۲۵۰ اتمسفر استفاده می‌کردند. سرانجام، در سالهای بعد گرایش مخالفی پیدایش یافت. کوششی، غالباً موفق، به‌عمل آمد تا با فشارهای نسبتاً پایینتر، بین ۸۰ تا ۱۹۰ و حتی ۱۰ تا ۱۳ اتمسفر کار شود. با تغییر دادن

نوع این تأسیسات و بویژه تغییر کاتالیزورها نتایج بسیار متفاوتی به دست آمد. واکنش ترکیب نیتروژن - هیدروژن، در اصول تغییری نکرده بود و سرانجام این واکنش به طور صنعتی عملی می شد، چه در فشارهای متوسط حدود ۲۵۰ اتمسفر، چه در فشارهای بالای ۸۰۰ تا ۹۰۰ اتمسفر.

یک تحول پرهیجان: دیده شد که انواع روشهای تثبیت نیتروژن با اکسایش مستقیم، چگونه بوده اند. در جنب قوس بیرکلند و اید که به توسط یک میدان مغناطیسی دمیده می شد، انواع دیگری از کوره ها با سرنوشت های متفاوت به کار گرفته شدند: کوره های قوسی گردان که توسط میدان مغناطیسی موسیتستیسکی<sup>۱</sup> یا زیرت<sup>۲</sup> دمیده می شوند و در سويس کار گذاشته شدند؛ کوره های قوسی دمیده شونده با هوای تحت فشار، ساخت شونهر یا پاولینگ که در کشورهای آلمان، ایتالیا، فرانسه و نروژ ساخته شدند. اما همینکه جنگ به پایان رسید مؤسسات مختلف که غالباً با سرمایه های بین المللی تغذیه می شدند به رشته های دیگر الکتروشیمی روی آوردند.

گوناگونی این تأسیسات را می توان از جنبه تجهیزات جذب گازهای نیترو و میعان اسید هم بررسی کرد. این مشکل برحسب اینکه فراورده های اکسایش مستقیم نیتروژن یا اکسایش آمونیاک باید عمل آورده شوند تغییر می کند. راه اخیر که پس از صنعتی شدن راه نخست کشف شد، در ابتدا از راه نخست راه حل هایی را اقتباس کرد تا برای رفع نیازهای خود، آنها را مناسب سازد. اما، در هر دو راه، فراورده های مشابهی که از کوره های اکسایش خارج می شدند مورد عمل قرار نمی گرفتند. بنابراین، لازم آمد که بخارهای نیترو تشکیل شده بوسیله اکسایش آمونیاک را برحسب خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها مورد عمل قرار داد. در اینجا ما وارد توصیف راه حل های گوناگونی که مورد بررسی یا عمل قرار گرفتند، نخواهیم شد و تنها این واقعیت را خاطرنشان می کنیم که تکنیک های نوین ساخت اسید نیتریک منحصر به شکلهای تغییرناپذیری نبودند، بلکه عکس آن حقیقت داشت.

گسستن از شیمی صنعتی کلاسیک سده نوزدهم در اینجا بروشنی دیده می شود. در واقع در مراحل اولیه صنعت بزرگ شیمی آلی و ساخت رنگهای مصنوعی، همین جریان را دیدیم. اما می توان اندیشید که آنهایی که در آن زمان به پیدایش یک شاخه جدید صنعتی کمک کردند طبعاً با ویژگیهای آن آمیختند. در مورد صنعت نیتروژن، همان طور که در گذشته تأکید کردیم، باید گفت که با چرخشی مواجهیم که از روشهای کلاسیک شیمی معدن جدا شده است. و این ادعایی است که ارزش اثبات را دارد.

برای اینکه تصور باز هم کاملتری از راههای گوناگونی که طی سالهای ۱۹۱۰ - ۱۹۲۰ رواج داشتند به دست دهیم، اقدامات صنعتی کردن تثبیت نیتروژن را، به طور خلاصه، به توسط سیانورها

یا نیترورها، بازگو می‌کنیم. به یاد می‌آوریم که پژوهشهایی که به کشف سیانامید انجامیدند، باید قبلاً سیانور را آشکار می‌ساختند. آقایان فرانک و کارو در سال ۱۸۹۳ سیانور را دقیقاً به دست آورده بودند.

این کار در واقع ادامه کوششهای بسیار قدیمی بود که نخستین دستاورد آن در صنعت مربوط به آقایان پوسوز<sup>۱</sup> و بوواسیر<sup>۲</sup> در سال ۱۸۴۳ می‌شد، و تا حدود ۱۹۲۰ ادامه یافت. مدتهای زیاد امید داشتند که بتوانند نیتروژن را در حالت سیانیدی تثبیت کنند و برای این کار، جریان گاز را روی مخلوطی از زغال و کربنات بگذرانند. در این زمینه هم انواع روشها وجود داشته است.

همین‌طور، تثبیت نیتروژن روی فلزات، در شکل نیتريدها، که یک واقعیت شیمیایی است، هرگز شکل یک روش صنعتی رضایتبخش نداشته است. طولانیترین تلاشها بی‌شبهه به ساخت نیتروآلومینیم ارتباط دارد که می‌توانست همزمان با استخراج الکترولیزی این فلز باشد. در فرانسه، کار اصلی یا تنها کار، حدود سال ۱۹۱۳ در سن ژان دومورین بود اما ردیف اختراعاتی که در این مورد به ثبت رسیدند گویا زیاد روشن نبودند. در همین خط، پژوهشهایی مربوط به تهیه نیتروهای دیگر، سیلیسیم و تیتان، سرانجام به علت سود ناچیز صنعتی فراورده‌های به دست آمده، متوقف شد. تبدیل صنعت نیتروژن در جریان ثلث نخست سده بیستم، با جدولهایی که آقای پل پاسکال در ۱۹۳۲ تنظیم کرده است بخوبی روشن می‌شود. همه ارقام این جدولها، نیتروژن خالص موجود در ترکیبات صنعتی گوناگون را نشان می‌دهند. توزیع منابع گوناگون به شکل زیر تحول یافته‌اند:

نیتروژن طبیعی	نیتروژن پخت کک	نیتروژن سنتز	
۱۹۰۵	۶۷٫۷٪	۳۲٫۳٪	۰٪
۱۹۲۰	۴۳٫۹٪	۳۱٫۷٪	۲۴٫۴٪
۱۹۳۰	۱۹٫۱٪	۱۶٪	۶۴٫۹٪

همین بررسی آقای پل پاسکال، در صفحه ۶۶۷ جلد III کتاب *Traité de chimie minérale* به شکل بسیار روشنی، تحول «برهیجانی» را که صنعت نیتروژن طی این دهه‌ها بر خود دیده است نشان می‌دهد - تحولی که باید در سالهای پس از جنگ جهانی دوم، با کنار گذاشتن همه روشها، جز روش سنتز غیرمستقیم اسید نیتریک، با تهیه و اکسایش کاتالیزوری آمونیاک، پایان یابد.

## مواد مصنوعی در فراورده‌های سنتز

### نخستین عصر پلاستیکها

فاصله زمانی میان دو جنگ جهانی را محافلی از دانشمندان و صنعتگران، عصر پلاستیک نام نهاده‌اند. آنان بدین ترتیب خواسته‌اند دوران شکوفایی یکی از صنایع شیمیایی را تعریف کنند که گروههایی از مواد مصنوعی روزافزون از نظر تعداد و خواص را روانه بازار کرده است. شیمیدانها در دلبستگی به این مواد، تنها نبودند، کاربرد آنها بسرعت در همه جهات زمینه‌هایی یافت و نوع تدارکات، روشهای کاراندازی و فراورده‌های تمام‌شده صنایع بسیاری را تغییر داد.

درواقع، کهنترین ماده مصنوعی، سلولوئید، در سال ۱۸۶۵ شناخته شد. ساخت آن از سال ۱۸۷۰، همان‌طور که در گذشته دیدیم، بسرعت در ممالک متحده آمریکا رواج گرفت. در فرانسه نخستین کارخانه تولید سلولوئید به توسط برادران شمربر<sup>۱</sup> در شهر استن<sup>۲</sup> گشایش یافت. برادران شمربر به حساب آقای ج. و. هایت مخترع، آنجا کار می‌کردند. بعدها کارخانه‌های دیگری در آلمان و انگلستان برپا شدند.

اما مشتقات سلولوز، پلاستیکی یا ناپلاستیکی، صرفاً فراورده نوعی تبدیل یک ماده طبیعی

1. Schmerber 2. Stains



هستند که به شکلهای گوناگون به فراوانی کاربرد دارد. مواد تولید شده، سلولوئید، فیلم و فیبر خواصی معین و کاربردی محدود دارند.

در پایان سده نوزدهم و آغاز سده بعدی در حدود دو دهه برای تغییر کامل چشم‌اندازهای تولیدکنندگان و نیز مصرف‌کنندگان کارهای گوناگونی انجام گرفته است.

این مرحله نخست تغییر شکل صنعت پلاستیکها با کاربرد و ترکیبات ساده‌تر از سلولوز، از قبیل فراورده‌های صنایع شیمیایی، فنول، اوره، فورمول (فورمالدهید) به‌عنوان مواد خام و استفاده از واکنشهای تراکمی، سپس پدیده‌های بسپارش (پولیمریزاسیون) مشخص می‌شود. بنابراین خود شیمیدان، درشت‌مولکول را، که در گذشته از طبیعت می‌گرفت، برای ساختن جانشینهای مواد سنتی مورد استفاده در ساختمانهای متعدد، می‌سازد. این مواد جانشینی، غالباً مشخصاتی بهتر از مواد سنتی دارند.

کازئین جامد: آقایان اسپیتلر<sup>۱</sup> و کریش<sup>۲</sup> که در سالهای ۱۸۹۷ تا ۱۸۹۹ طرز تهیه یک ماده شاخی مصنوعی را با عمل آوردن کازئین بوسیله فورمول جست‌وجو می‌کردند طرز تهیه کازئین جامد را روشن ساختند.

کازئین موجود در شیر خامه گرفته شده با روشهای مختلفی از مدتی پیش برای ساختن انواعی چسب یا لعاب به‌کار گرفته می‌شد. می‌توانستند آن را با افزودن مایه پنیر، دیاستازی که در شیردان گوساله‌ها وجود دارد، یا به توسط تخمیر لاکتیکی طبیعی، یا با اسیدی کردن مصنوعی شیر بدون خامه با اسید استیک، کلریدریک یا سولفوریک به‌دست آورند. در آن زمان می‌دانستند که چگونه از آن برای تهیه نوعی کف دریای مصنوعی، سیلیکات منیزی که بهای گزافی داشت استفاده کنند. برای این کار، کازئین را با اکسید منیزیم نکلیس شده و اکسید روی مخلوط می‌کردند. اما این اجسام پایدار نبودند و پس از مدتی خراب می‌شدند.

... به توسط فورمول: سخت کردن کازئین به توسط فورمول می‌تواند در مقیاس صنعتی انجام شود، زیرا آقای ۱. تریللا<sup>۳</sup> پس از چند سال بررسی، برای تهیه این آلدئید مورد استفاده صنعت، روشی یافت. فراورده نخستین، الکل متیلیک بود که در آن زمان یک فراورده جنبی و فراوان تقطیر چوب بود. اکسایش آن با اکسیژن هوا در یک وسیله تقطیر که لوله‌الات آن محتوی مس بودند آن را به آلدئید تبدیل می‌کرد. تولید صنعتی آن که معلوم شده بود می‌تواند عاملی برای سخت شدن کازئین باشد طی چند سال گسترش یافت و به فراورده‌ای نسبتاً فراوان و ارزان تبدیل شد. پس از روش آقای تریللا، روشهای دیگری پیش کشیده شدند. این روشها به‌طور کلی تنها از لحاظ کاتالیزور

با روش تریلا تفاوت داشتند. باین حال، کاربرد صنعتی فورمول به مقدار زیاد برای تهیه رزینهای فنولی یا اورهای، که بعدها با آنها برخورد خواهیم کرد، تنها زمانی عملی شد که سنتز مستقیم الکل متیلیک (متانول) در سال ۱۹۱۳ در BASF انجام گرفت و در ۱۹۲۲ بوسیله آقای پاتار<sup>۱</sup> فرانسوی تکمیل شد. این روش مطابق یک روش کلی سنتز؛ برپایه گاز آب عملی می شود. بعداً در موقعیتی بدان باز خواهیم گشت.

کازئین جامد با آغاز سده بیستم با نامهای گوناگون بازرگانی ساخته می شد که رایجترین آن در فرانسه، گالالیت *galalithe* نام داشت. کازئین مورد استفاده، بویژه کازئین خمیر مایه ای بود که تهیه آن مراحل مختلفی داشت؛ از شست و شوی ابتدایی گرفته تا نمزنی و افزایش بارهایی به آن، شکل دادن و بالاخره پرس کردن آن بود. ماده مورد عمل، که نخست برای صنعت کاغذ و تولید می شد، سپس برای تهیه سلولوئید، هرگاه برای این کار، اشکالی داشت، آن اشکال به آسانی برطرف می شد. شکل نهایی آن، صفحه ای، به شکل نی، لوله ای، دگمه ای و ... پیش از افزایش فورمول به آن داده می شد. فورمولدهی در واقع از راه واکنش تراکمی، انجماد را تحریک می کند. چگونگی این واکنش تراکمی هنوز شناخته شده نیست و برخلاف رزینهای مصنوعی دیگری که بعدها شناخته شدند، ادامه نمی یابد و به واکنش بسپارشی نمی انجامد. بدین ترتیب جسمی تهیه می شود که تنها در تهیه مهره های تخته و شطرنج می تواند به کار رود، اما در زیر این عنوان، تنها رزینهای کازئینی سریعاً رواج یافتند.

پشم کازئینی: بعدها، در ۱۹۳۵ آقای فرتی<sup>۲</sup> ایتالیایی توانست کازئینی را که به شکل رسوب در اسید سولفوریک به دست آورده بود، پس از به اصطلاح رسیده شدن و انعقاد در یک محلول اسیدی، با ریسیدن به شکل پشم درآورد. این «پشم» کازئین در اروپا نخست با نام لانیتال *lanital* موقعیتی به دست آورد. تولید آن پس از جنگ جهانی دوم، در آمریکا هم ادامه یافت. اما تنها منبع کازئین قابل استفاده، باز هم شیر بود، گرچه دهها سال کوشش شد تا کازئین را از بعضی گیاهان، بویژه سویا استخراج کنند. پروتئیدهای دیگری نیز بررسی شدند که فراوانترین و اقتصادیدترین منبع آنها کتجاله روغن گرفته بادام زمینی بود. بدین ترتیب، در سالهای ۱۹۵۰ الیاف پروتئیدی به بازار آمد که در نساجی مخلوط با پشم به کار گرفته شدند. اما الیاف مصنوعی که بعدها شناخته شدند و سرعت گسترش یافتند با الیاف کازئینی رقیب شدند.

تراکم فنول-فورمول: کمی پس از پیدایش رزینهای کازئینی جامد، آقای لئوهندریک باکلند<sup>۳</sup> شیمیدان با تبار بلژیکی توانست با فراورده های تراکم فنول و فورمول یک رزین مصنوعی تازه با

نام باکلیت را به‌دست آورد که موفقیت آن سریع بود. تا آن زمان، لعاب (ماگما)هایی که در بعضی از شرایط تشکیل می‌شدند مزاحم شیمیدانها بودند و سعی در برطرف کردن آنها می‌شد. با این حال آقای بایر شیمیدان آلمانی در سال ۱۸۷۲ فراورده‌های تراکم فنول - فورمول را بررسی کرده بود، بدون اینکه انتظار کاربرد صنعتی از آن داشته باشد. نخستین اختراعی که در این باره به ثبت رسید در آلمان در ۱۸۹۱ به نام کلایبرگ<sup>۱</sup> بود. اختراعات دیگری از پی آمدند: اختراع لئونارد لدرر<sup>۲</sup> ۱۸۹۴، آرثر اسمیت ۱۸۹۹، لوفت<sup>۳</sup> ۱۹۰۲. دو سال بعد آقای باکلند به این موضوع علاقه‌مند شد.

آقای باکلند چند سال بود در ممالک متحده آمریکا ساکن شده بود و در یک کارخانه سازنده کاغذهای عکاسی Velox برای تسریع در این کار تحقیق می‌کرد. وی که از آزمایشهای پیشین آگاه بود هشیارانه کوشید تا دشواریهای موجود را مرتفع سازد و در تحقیقات خود، سه محور اصلی را مورد توجه قرار داد: نوع کاتالیزور، اسیدی یا قلیایی (نسبت فنول به فورمول) در مخلوط واکنش، دمای کار. باکلند محیط قلیایی را برای تراکم و نیز دمای بالا را برگزید. نخستین نتایج قابل قبول را در سالهای ۱۹۰۸ - ۱۹۰۹ به‌دست آورد و شرکت خود را، به نام باکلیت در ۱۹۱۰ تأسیس کرد. اختراع باکلند، صنعت مواد پلاستیکی مصنوعی را بکلی تغییر شکل داد. باکلیت نمونه خانواده‌ای از رزینها بود - خانواده فنوپلاست، که تعداد آن با تغییر دادن این یا آن جزء سازنده سرعت افزوده می‌شد و ده سال بعد بر همان اساس خانواده دیگری، آمینوپلاست را، به وجود آورد که گرچه به اندازه فنوپلاست، پر از دحام نبود، اهمیت اقتصادی آن با دیگری برابر بود. باکلیت، نمونه رزینیایی بود که بعدها آن را گرماسخت<sup>۴</sup> نامیدند، در برابر رزینهای گرمانرم<sup>۵</sup> که ساخت آنها از سال ۱۹۳۰ با روشهای سنتزی آغاز شد.

باید گفت که تکنسین‌های شیمی عملاً با ساخت باکلیت و تعدادی فنوپلاست، نخستین تمرین خود را از امکانات متعددی که در برابر داشتند به عمل آوردند. در واقع با روشهای مختلف تهیه، نخستین ردیف مواد با خواص فیزیکی گوناگون را ساختند: نولاک novolaque، که در حلالهای آلی سخت نمی‌شود؛ رزیت résite که سخت می‌شود و محلول نیست؛ و رزول résol، که بینابین است.

وانگهی می‌توانستند با ترکیب آنها نیز بازی کنند و آلدئید فورمیک یکی را با آلدئید، بنزآلدئید، آکرولئین، فورفورال ... و از سوی دیگر فنول را با بعضی از همرده‌های آن نظیر کرزول یا کسینول عوض کنند. همه این اجسام یا از مواد طبیعی به‌دست می‌آیند یا از ترکیبات ساده‌تر، اما از ریشه طبیعی.

تجارتی شدن فنوپلاستها: بدین ترتیب، فراورده‌های بالا به اشکال فیزیکی و با امکانات گرماسختی بسیار گوناگون ارائه می‌شوند: مواد ریخته‌گری به شکل مکعبها، صفحات، باتونها، روکشهای روی حاملی نظیر کاغذ، پارچه، چوب که منظره، رفتار و کارایی را تغییر می‌دهند، گردهای قالب‌گیری شامل مواد پرکننده، مواد شکل‌دهنده، تسریع‌کننده سخت‌شوندگی و رنگ‌دانه.

مصرف‌کنندگان فنوپلاست، نخستین شکوفه‌های اجسامی را در برابر خود یافتند که پاسخگوی نیازهای بسیار وسیعی بود که در آن زمان به برکت گوناگونی وسایل موجود: قالب‌گیری، برش، سوراخکاری و غیره ایجاد شده بودند؛ و نیز خواصی که پس از بسپارش نهایی: پایداری در برابر اعوجاج، سختی، خراب نشدن در اثر عوامل جوی و شیمیایی، حل‌ناشدن و خواص دی‌الکتریکی به دست می‌آمدند.

گرچه تولید رزینهای فنولی در سالهای ۱۹۱۰ آغاز شد، گسترش واقعی آنها در دو دهه بعد بود. به نظر نمی‌رسد که جنگ جهانی اول، در پیشرفت آن تأثیر زیادی داشته باشد. کاربرد آن در مقیاس زیاد، حتی در شروع تولید، مستلزم تکثیر یک ماده خاصی است که بدون شک تقاضاهای نظامی بسیار مبرم، جلوی آن را می‌گیرند. خواهیم دید که جنگ جهانی دوم تأثیر دقیقاً منفی روی صنعت مواد سنتزی داشته است.

پرورش تکنسین‌هایی نه تنها در رشته ساخت، بلکه در امر کاربرد هم لازم بود. همه این مسائل در سالهای ۱۹۱۰ - ۱۹۲۰ هنوز به شکل بسیار تجربی حاصل می‌شدند.

اما با آغاز دهه ۱۹۲۰، گسترش رزینهای مصنوعی سرعت گرفت. فنوپلاستها در شما روزافزونی به بازار آمدند. در سال ۱۹۳۹ بیش از ۲۰۰ نام مواد فنوپلاستی در بازار دادوستد می‌شد که از آن میان، پس از باکلیت، نامهای: novolak, gedelite, fabrolite, cegeite, formica, durite, proglite, pertinax و ... بسیار شهرت داشتند.

زمانی که این فراورده‌های سنتزی ساخته شدند سرعت تحول در صنایع گوناگونی افزایش یافت. صناعی که مواد مطلوب خود را در رزینها یافتند. در آغاز صنعت برق که باکلیت، یا همرده‌های آن، رفته‌رفته جانشین مواد عایق در ساخت تجهیزات کوچک و سپس قطعات مهمتر و طبعاً صنعت نوزاد پخش رادیویی شدند. این پدیده بعداً در صنعت اتومبیل‌سازی آغاز شد که در امریکای پیش از جنگ، وارد مرحله راسیونالیزاسیون (عقلانی کردن، کفایت‌افزایی) روشهای ساخت شده بود و بیش از پیش وسایل قالبی را جذب می‌کرد. سرانجام صنایع فراورده‌های با مصرف زیاد، عروسک‌سازی، ساخت مهره‌های تخته و شطرنج، لوازم خانگی، جهانگردی و غیره، تا ساخت مبل و صندلی، پس

از اندک مدتی مشتریان فراوان یافتند.

اما فنوپلاستها، معایبی هم داشتند که مانع پخش آنها در بعضی از زمینه‌های کاربردی از قبیل تزئین، اشیاء شیشه‌ای یا قطعات فانتزی می‌شد. همه آنها کدر و غالباً قهوه‌ای رنگ، اما همیشه تیره بودند. حتی زمانی که رزینهای فنولی را به شکل ورقه‌های شفاف به دست آوردند، باز سرعت زردرنگ می‌شدند.

شیشه‌های سلولوزی: مشتقات نیتروژندار سلولوز، و نیز مشتقات استیلنی آن هم، پس از این که در اواخر سالهای ۲۰ دشواریهای ساخت آنها برطرف شدند تا مدتها برتریهای تردیدناپذیر خود را در بسیاری از کاربردها حفظ کردند. نه تنها آنها در قسمت ساخت فیلم به عنوان تکیه‌گاه امولسیون عکاسی یا به عنوان وسایل بسته‌بندی، ورنیها جانشین ندارند، بلکه امکاناتی برای نوآوریهای هم ایجاد کردند.

سلولوئید در ساخت اتومبیل، با نام میکا برای داخل درب ورودی بعضی خودروها به کاربرد شده است. حدود ۱۹۱۹ - ۱۹۲۰ ساخت نوعی شیشه بیخطر آغاز شد. در فرانسه به این نوع شیشه، سه‌لایه‌ای *triplex* می‌گفتند که از دو ورقه نازک شیشه ساخته می‌شدند که لایه نازکی از نیتروسولولوز آنها را به هم چسبانید، بود. در این باره معمولاً از حادثه آزمایشگاه آقای بندیکتوس<sup>۱</sup> شیمیدان فرانسوی صحبت می‌شود که در سال ۱۹۱۰ قدرت چسباندگی نیتروسولولوز را روی شیشه با رها کردن یک شیشه کلودیون ضخیم به نمایش گذارد. اما با یادآوری این نکته که مصرف‌کنندگان متعددی پیش از وی این مشاهده را داشته‌اند، باید دقیقتر فکر کنیم. در واقع این شیشه دولا به چسبیده، که در شکستن متلاشی نمی‌شود برای شیشه جلو راننده بسیار مناسب است. با این حال، رواج کاربرد آن مستلزم گذشت ده سال بود. استات سلولوز بنوبه خود، در این کار جانشین نیتروسولولوز شد و بعدها طی سالهای ۳۰ شاهد پیدایش شیشه آلی هستیم که تأثیر زیادی در ساختمان سفینه‌های هوایی داشته است.

آمینوپلاست: رزینهایی که از راه تراکم اوره و فورمول تهیه شده‌اند بی‌درنگ موفقیت بزرگی به دست آوردند زیرا کدورت رزینهای فنوپلاست را نداشتند و خانواده آنها مواد تازه‌ای را تشکیل می‌دادند که تکمیل‌کننده مواد موجود در آن زمان بودند. گرچه ترکیبات ممکن در اثر تغییر یکی از دو ترکیب پایه‌ای آنها، از خانواده فنوپلاست بسیار کمتر بود، باز تنوع بسیار خوبی در آنها دیده می‌شد. ردیف این ترکیبات مثل فنوپلاستها در شکل صفحه، نی، ورق، رزینهای قابل ریخته‌گری و رزینهای آسیا شونده تولید می‌شدند. مواد به دست آمده نیز از نوع گرماسخت بودند، یعنی در اثر گرما، به‌طور قطعی

شکل قالب روزنرانی شده، نورد یافته خود را، پس از پلی‌کندانساسیون (تراکم مرحله‌ای) - چون هنوز نمی‌توان آن را بسپارش گفت - حفظ می‌کنند.

درواقع، طرحهای کلی تراکم و تراکم مرحله‌ای هرگز نتوانسته‌اند مدلهایی از زنجیره‌های مولکولی بدهند که ساختار آنها غیرقابل بحث باشد. در عمل، کار آنها تقریباً روی مواد سنتزی بود. سازه‌های اولیه، یک مولکول بسیار ساده داشتند که ممکن بود از عناصر بازی باشند. برای فورمول، آن را دیدیم. اوره  $\text{OC} \begin{matrix} \text{NH}_2 \\ \text{NH}_2 \end{matrix}$  یا از کربورکلسیم با تبدیل آن به سیانامید و فعل و انفعال آب روی آن،

یا از گاز کربنیک کوره‌های پخت آهک و آمونیاک مایع به‌دست می‌آید.

اما ساخت اوره در عمل و بویژه واکنشهای تراکمی، سپس تراکم مرحله‌ای اوره - فورمول، بیشتر به تکنیکهای آمینوپلاستها نزدیک هستند تا به فنوپلاستها. درواقع، این روشها مبتنی بر کار تجربی هستند و در این کار، بعضی دستورالعملهایی که به تولید محصول رسیده‌اند تقریباً ثابت می‌مانند. بعدها خواهیم دید که مواد سنتزی، محصول نوعی عملیات خردمندانه هستند.

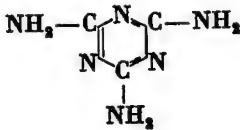
امتیاز تراکمهای نخستین اوره - فورمول از جنبه کاربرد محصول آنها به‌عنوان مواد پلاستیکی، بی‌تردید بوسیله آقای هانس جونز<sup>۱</sup> (اهل چک‌واسلواکی)، کمی زودتر از فریتس پولوک<sup>۲</sup> اتریشی در سال ۱۹۲۰ به ثبت رسیده است، و در سالهای بعد دو کارخانه انگلیس امتیاز عملی کردن آن را به‌دست آوردند. مواد جدید با نامهای پولوپا (pollopas)، که در هم‌ریخته نام مخترع آن است به بازار فرستاده شدند.

افزایش شمار خانواده آمینوپلاست: در خلال سالهای ۱۹۲۶ - ۱۹۲۹ بود که رزینهای اوره - فورمول بازار گسترده‌ای یافتند. این مواد شفاف می‌توانستند شیشه‌های واقعی آلی بسازند و مواد پرکننده و رنگدانه‌ها نیز به شیشه ساخته شده، رنگهای تند و شادی می‌دادند که در متن کدر و یکنواخت فنوپلاستها، برجسته می‌نمود. مردم از نو احساس کردند که فهرست پلاستیکها باز هم طولیتر شده است.

خانواده آمینوپلاستها با تعویض اوره با ترکیبات دیگر نیتروژنی دارای ساختار مشابه، گسترش یافت. نزدیکترین ترکیب به اوره، ترکیب تیوره است که در آن گوگرد جانشین اکسیژن شده است. تراکم آن با فورمول، رزینهایی می‌دهد که خواص بسیار مشابهی با اوره - فورمول دارند.  $\text{SC} \begin{matrix} \text{NH}_2 \\ \text{NH}_2 \end{matrix}$

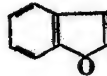
از میان همه ترکیبات نیتروژنی، ملامین، تری‌سیانامیدی است که با گرم کردن دی‌سیانامید با

آمونیاک به دست می‌آید و به فرمول زیر پاسخ می‌دهد.



این ترکیب با فرمول واکنشی می‌دهد و با تثبیت سه مولکول از این آلدئید و این مشتق می‌تواند متحمل تراکم مرحله‌ای و حذف آب شود. به ساختار سه بعدی این درشت مولکول، بسیار نزدیک شده‌اند. نخستین امتیاز در این باره در سال ۱۹۳۵ از طرف امریکا در زمان جنگ شروع شد. پودرهایی برای ریخته‌گری از رزینها تا ورنی تهیه شد؛ اما آنها بویژه به عنوان اندود و چسب بازار گسترده‌ای، بویژه در صنعت چوب به دست آوردند.

رزینهای کومارون: سرانجام گروه دیگری از رزینها، متفاوت از گروههای پیشین، در جریان جنگ جهانی اول در آلمان در مقیاس صنعتی ساخته شدند. ماده خام آنها دو ترکیب شیمیایی با فرمولی



بسیار نزدیک به هم، کومارون ، و ایندن هستند که اکسیژن جای خود را به گروه

$\text{CH}_2$  داده است. آنها حلالهای نفتا را تشکیل می‌دهند که با تقطیر قطرانهای زغال سنگ استخراج می‌شوند و این مخلوط به آسانی، تحت تأثیر اسید سولفوریک، بسیار می‌شود. تجربه‌ای که از ساخت انواع دیگر رزینها به دست آمده بود به شیمیدانهای آلمان امکان داد تا از این بسپارش برای ساخت فراورده‌های محلول در حلالهای آلی و روغن‌ها و اجسام دارای خواص دی‌الکتریک بالا به آسانی الگوسازی کنند. این فراورده‌ها در صنعت رنگرزی و ورنی، در ساخت کاتوچو به عنوان شکل دهنده، در تهیه پارچه‌های آب‌ناپذیر، و بالاخره در صنایع برق به عنوان عایق به کار گرفته می‌شوند.

بعدها ساختار پلی کومارونها را بدلیل ساختار خطی آنها به مشتقات پلی وینیلی نزدیک دانستند. اما، طی نخستین دوران کاربرد آنها، هیچ اطلاعی از ساختار پلی کومارون در دست نبود. باین حال، آنها در زمان خود به افزایش تنوع مواد پلاستیک کمک کرده بودند و این صنعت در سالهای ۲۰ تا ۳۰ مرحله‌ای از گسترش سریع را پشت سر گذاشت که مصرف‌کنندگان و خود تولیدکنندگان را به شگفتی آورد. علاوه بر صنایع مصرفی که دستخوش تحولات گاهی بسیار عمیق شده بودند، صنایع شیمی هم احساس می‌کرد که وارد عصر تازه‌ای می‌شود.

به دنبال ارزاتس: در آن زمان دوره‌ای سپری می‌شد که کشورهایی میل داشتند نوعی اقتصاد خودکفا را برای پایین آوردن کمبودهای تراز بازرگانی خود و آماده شدن برای یک اقتصاد زمان جنگ

به پیش ببرند. مواد پلاستیکی به عنوان «ارزاتس»<sup>۱</sup> برای جانشینی مواد طبیعی کمیاب یا بسیار گران در نظر گرفته شدند. ملتهای دیگر برای پرهیز از رقابتی که خطرناک تلقی شده بود، گسترش این صنایع را تجویز کردند. باین حال، موفقیتهای مواد پلاستیکی نخستین دوران، تنها مدیون این نوع دلواپسی جهان صنعتی از وقوع یک فاجعه نیست.

این مواد کاربرد ویژه خود را در تکنیکهای تولیدی سرشار از تحولی یافتند که از بهکارگیری آنها منتفع می‌شد. دانشمندان، تکنسین‌ها و صنعتگران در این باره اشتباه نکرده بودند. این رکود اقتصادی بود که به احتمال قوی آنها را آگاهانه، به کشف راههای تازه برای بهکارگیری روشهای شیمی سنتز و آماده ساختن دومین عصری که پس از جنگ جهانی دوم می‌بایست پیروز شود واداشته بود. این تغییر زمانی ممکن می‌شد که نه تنها پژوهش آزمایشگاهی، واکنشهای تازه‌ای را برای گسترش امکانات تولیدی آماده کرده باشد، بلکه همچنین برای بررسی ساختار مواد و تعیین ویژگیهای مورفولوژیکی آنچه که می‌خواستند ایجاد کنند، وسایل تازه‌ای فراهم شده باشد.

### وسایل نوین علمی صنایع شیمی

انتقال از آزمایشگاه به کارخانه در پایان نخستین جنگ جهانی تا زمان کنونی، یک فرایند عمومی در همه رشته‌های گوناگون صنایع شیمی بوده است، و برای اینکه تصویری از گستره و بازتابهای آن داشته باشیم از آوردن چند نمونه استمداد می‌کنیم. در واقع در جریان سالهای ۲۰ تا ۵۰، صنعت تازه‌ای زاده شد و به یکی از عوامل اصلی تحول همه تکنیکهای تولید، و خدمات، تبدیل گردید، که همراه با تکنیکهای ارتباطات، مبانی اقتصاد و سیاست و نیز شرایط زندگی جمعی یا فردی را دستخوش تغییراتی کرد.

این پدیده، چیز تازه‌ای نیست و ما با آن طی مراحل پیشین آشنا شده‌ایم. و آن، طی سه یا چهار دهه، شدت بی‌سابقه‌ای یافت و منجر به قطع واقعی با همه روشهای سنتی باقیمانده از تکنیکهای شیمی شد. این پدیده طبعاً پس از سالهای ۵۰ هم ادامه یافت، اما دستاوردهای اساسی و بزرگ آن، بویژه در سالهای ۲۰ و ۳۰ بوده است. این حرکت به طور برگشت‌ناپذیری ادامه یافت و برخلاف تصورات موجود در اواخر سده نوزدهم، ساختارهای صنایع شیمی دیگر هرگز منجمد نشدند.

برای ساده کردن مسأله، می‌توان گفت که وسایل جدید، در آغاز، تولید صنعتی ترکیبات متعددی را ممکن ساختند که در آن زمان در کاتالوگهای شیمیدانها ثبت شده بود اما در بیرون از آزمایشگاه، هیچ کاربردی نداشتند. همچنین آنها امکان به دست آوردن اطلاع دقیق از ساختار درشت مولکولهای

۱. Ersatz: واژه آلمانی که برابر مواد جبرانی یا جانشینی است. - م.



طبیعی و مصنوعی را فراهم ساختند. سرانجام تهیه صنعتی آنها را بر روش سنتز، عملی کردند. واکنش گرینیار: باید توجه داد که صنعتگران برای بسط تعداد فراورده‌های خود، واکنشهایی را، بویژه در شیمی آلی به‌کار می‌گرفتند که در سی یا چهل سال پیش، شناخته شده بودند و در بیرون از آزمایشگاه کاربرد آنها آغاز شده بود.

در همین رده باید از نمونه واکنش گرینیار یاد کنیم که تولید مشتقات آلی منیزیم‌دار مختلط بوسیله آن انجام گرفت. شروع کارهای آقای ویکتور گرینیار در سال ۱۹۰۰ بود، اما آنها از خاصیت آن که در سال ۱۸۴۹ بوسیله ادوارد فرانکلند<sup>۱</sup> شیمیدان انگلیسی معلوم شده بود ملهم می‌شدند. این خاصیت در نمکهای هالوژید آلی، مثلاً یدوراتیل  $C_2H_5I$  نیز بود و فلز روی را تنها با گرم کردن در خود تثبیت می‌کردند. ترکیب ناپایدار  $C_2H_5 - ZnI$  در هنگام تقطیر، که برای باقی گذاشتن یک ارگانوزنسیک متقارن، در این مورد  $C_2H_5 - Zn - C_2H_5$  لازم بود تجزیه می‌شد. این اجسام، مصرفی نداشتند، زیرا در هوا خودبه‌خود اکسید می‌شدند.

حدود پنجاه سال بعد، آقای باریه که استاد گرینیار در لیون بود کوشید تا در مشتقات فرانکلند به‌جای روی، منیزیم را تثبیت کند. آقای گرینیار که با این نمونه، طرز کار را شناخته بود توانست در سال ۱۹۰۰ ترکیب آلی منیزیم‌دار مختلط با فرمول  $R - Mg - X$  را به‌دست آورد. وی برای این کار، عنصر منیزیم را روی یک ترکیب آلی هالوژندار تثبیت کرد. این واکنش افزایشی با ریختن آرام ترکیب هالوژندار در اتری بی‌آبی که، تراشه‌های منیزیم را در خود داشت به‌آسانی انجام گرفت. محلول اتر به‌دست آمده، همان واکنشگر گرینیار است که خصلت عمومیت داشتن آن فوراً آشکار شد.

در واقع، وی بنیان غیرمشخصی،  $R$ ، یک هالوژن (کلر، برم، ید)  $X$  را نشان داده بود، و حلال می‌توانست یک اتر - اکسید دیگر باشد. این واکنشگر می‌توانست به‌عنوان یک عامل سنتزی جهت تهیه کربیدها، مشتقات هالوژنی، اسیدها، الکل‌های نوع اول، دوم یا سوم، ستونها به‌کار رود، که در آنها بنیان اولیه می‌توانست با دیگر بنیانهای آلی متحد شود.

پیوند دوگانه میان کربن و اکسیژن اکثر عوامل آلی، آلدئید، ستونها، کلرور اسید (انیدرید کلر)، یا گاز کربنیک، آمادگی ویژه‌ای برای تثبیت واکنشگر گرینیار دارد و سپس در اثر هیدرولیز، در تولید مولکولی که بنیانهای گوناگون را روی یک گروه عاملی جدید متحد می‌سازد.

از میان پژوهشهای فراوان آزمایشگاهی، که در سایه واکنشگر گرینیار انجام گرفته است می‌توان در اینجا از پژوهشهای ف. س. کپینگ<sup>۲</sup> انگلیسی در ۱۹۰۴ روی مشتقات آلی سیلیسیم یاد کرد که حدود چهل سال بعد به ساخت سیلیکونها، که بعدها درباره آن سخن خواهیم گفت، انجامیدند.

پس از این کشف گرینیار، بحث‌های نظری فراوانی دربارهٔ آن در گرفت اما در اهمیت این کشف، تردیدی نبود. آقای گرینیار در سال ۱۹۱۲ سومین جایزه نوبل شیمی را که به یک فرانسوی تخصیص داده شده بود دریافت، و آن را با پل ساباتیو تقسیم کرد. گرینیار نه تنها روش فوق‌العاده انعطاف‌پذیر و پرثمری برای سنتز اختراع کرده بود، بلکه راهی هم برای پژوهش گشوده بود که مدتها برای کشف همهٔ این روش، دنبال می‌شد. آقای ادمون بلز<sup>۱</sup> نیز همین اصلاحی را که آقای گرینیار در کشف باربیه ایجاد کرده بود، در روش فرانکلند وارد کرد. وی مخلوطهای آلی دارای روی تهیه کرد که خواص آنها خواص مخلوطهای آلی منیزیم‌دار را با کمی تفاوت تداعی می‌کرد. وی آنها را روی ستونها اثری نداد. می‌توان آنها را از مادهٔ اولیهٔ نوعی کلرور اسید تهیه می‌کرد.

ضدکوبش، ضداکسیژن: این زنجیر تا مشتقات لیتیم کارل تسیگلر<sup>۲</sup> و گیلن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۳۰ پیش رفت و واکنش‌پذیری آن روی گروههای گوناگون کربونیل، نقایص و اکشنگر گرینیار را جبران می‌کرد. سرانجام این زنجیر روی ترکیبات آلی سرب‌دار بسته شد. از میان این ترکیبات، سرب تترااتیل، پس از کارهای میجلی<sup>۴</sup> و بوید<sup>۵</sup> در ۱۹۲۱ روی ضدکوبشها برای بالا بردن عدد اوکتان بنزین موتورهای احتراقی، اهمیت فراوان یافت.

ترکیب سرب تترااتیل را با فعل‌و‌انفعال کلرور اتیل روی آلیازی از سرب و سدیم به‌دست می‌آوردند. اما روش دیگر تهیهٔ آن عبارت بود از تأثیر واکنشگر گرینیار روی کلرور سرب. ترکیب مورد نظر از کلرور و یدور منیزیم و منیزیم آزاد به‌دست می‌آمد.

تأثیر کاتالیزوری منفی سرب تترااتیل را به تأثیر «مواد ضداکسیژن» که آقایان شارل مورو<sup>۶</sup> و دوفر<sup>۷</sup> در همان زمان (۱۹۲۲) آنها را مطالعه می‌کردند نزدیک کرده بودند.

مواد ضداکسیژن این دو شیمیدان فرانسوی، به‌طور کلی، چند ترکیب آلی دارای یک عامل فنولی بودند که به‌مقدار بسیار اندک (*trace*)، به‌طور چشمگیری از خراب شدن اجسامی که در هوا اکسید می‌شوند، مانند آکرولئین، بعضی آلدئیدها، اسانس ترپانتین، روغن برزک و غیره، جلوگیری می‌کردند. از آنها بی‌درنگ برای نگاهداری طولانی این مواد استفاده کردند و فرآورده‌هایی هم که بعداً ساخته شدند، از قبیل کربورهای اتیلنی و پلی‌اتیلنی بنزینهای حاصل از کراکینگ گرمایی و کاتوچوهای سنتزی، زیر پوشش آنها قرار گرفتند.

واکنش فریدل-کرافتس: یکی از واکنشهای کاتالیزوری که از سدهٔ نوزدهم شناخته شده بود در ردیف روشهای ساخت سدهٔ بیستم قرار گرفت. از سال ۱۸۵۰ در پرتو کارهای فرانکلند دانستند که

1. E. Blaise    2. K. Ziegler    3. Gilman    4. Midgley    5. Boyd    6. Ch. Moureu  
7. Dufraisse

چگونه از مشتقات هالوژنی برای تهیه کربورهای بالاتر از کربورهای آغاز واکنش، مثلاً اتان، از دید متیل، پروپان، از دید متیل و دید اتیل استفاده کنند. خود هالوژن با واکنش یک فلز قلیایی برداشته می‌شود و دو بنیان با یکدیگر متحد می‌شوند. با روش مشابهی فریدل و زیلو<sup>۱</sup> برای نخستین بار، گلیسرین، تری الککل، را در سال ۱۸۷۳ از طریق سنتز تهیه کردند.

چند سال بعد، در ۱۸۷۷ آقایان فریدل و کرافتس متوجه شدند که کلرور آلومینیم می‌تواند در این نوع واکنش به عنوان کاتالیزور عمل کند و بویژه زمانی که یک هالوژنور الکوئیل، مانند کلرور متیل  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ، در حضور یک کربور آروماتیک، مثلاً بنزن گرم باشد. در این واکنش حذف اسید کلریدریک به حساب یک هیدروژن بنزن است که بنیان متیل، جایش را می‌گیرد و تشکیل تولوئن  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$  را می‌دهد. کلرور آلومینیم در پایان واکنش، مصرف نشده می‌ماند. این یکی از نخستین واکنشهای کاتالیزوری است که در صنایع ساخت ترکیبات آلی به کار رفته است. وقتی بدانیم که این واکنش می‌تواند با مشتقات هالوژنی هر یک از کربورهای آلیفاتیک (زنجیری) انجام گیرد متوجه می‌شویم که فایده آن بسیار بیش از تولوئن تنهاست. از جمله، ترکیبات اشباع نشده با پیوند دوگانه اتیلنی، بعدها منبع تولید فراورده‌های بسیار شدند.

واکنش فریدل و کرافتس زمانی به یک روش تولید صنعتی تبدیل شد که چهل سال از کشف آن گذشته بود. این واکنش اساس نخستین کوششهای کراکینگ کاتالیزوری - ابتکار آقای مک آفی در ۱۹۱۵ - بود. اما این روش به علت هزینه تولیدی بسیار گزاف کلرور آلومینیم کنار گذاشته شد. در موقعیتهای زیاد دیگری این واکنش کلرور آلومینیم راه را برای ساختهای شیمیایی بسیار باز کرد، حتی به محض آشنایی با این راه، روشهای دیگری برای رسیدن به همین اجسام، خود را تطبیق دادند.

زمینه مشترک روشها: این واکنشها و واکنشهای زیاد دیگری به دنبال آن، به فهرست واکنشهایی افزوده شدند که صنایع شیمیایی از مدتها پیش آنها را به کار می‌برد، نظیر نیتروژندی، دو نیتروژندی (دیازوتاسیون)، گوگرددهی (سولفوراسیون)، ذوب قلیایی و غیره، و نیز شمار زیادی از آنها برای ساخت رنگ‌های سنتزی، کاربرد صنعتی یافتند. در فاصله سالهای ۱۹۱۰ تا ۱۹۴۰، اهمیت اکثر آنها در صنعت، تقریباً همگام با تنوع راههای گوناگونی که در آزمایشگاه برای اجرای این عملیات بسیار دقیق کشف می‌شدند، افزایش یافت. کاربرد آنها غالباً متضمن نیاز به وسایل بزرگتری بود، که در ابتدا تنها برای تهیه مقدار بسیار محدودی از این ماده ساخته شده بودند که برای جداسازی ماده مورد نظر یا با روشهای فیزیکی: استخراج، تقطیر، تبلور و غیره، عمل می‌کردند یا با واکنشهای

شیمیایی. این بررسی‌ها که در آزمایشگاههای مؤسسات بزرگ انجام می‌گرفتند، گاهی به کاربرد آگاهانه روشهایی می‌انجامید که زمانی برای رفع نیازهای صنایع سنتزی، ابتکار شده بودند؛ از گسترش هیدروژندهی کاتالیزوری، که همان‌طور که دیده شد، برای صنعت نیتروژن آغاز شد، گرفته تا عمل آوردن فراورده‌های نفتی که در همان زمان راههای تازه‌ای را در پیش گرفته بود.

نمونه‌ای از سالهای ۱۹۳۰ بخوبی نشان می‌دهد که چگونه انتقال آزمایشگاه به کارخانه، رفته‌رفته رها کردن واکنش نخستین را به سود روشهایی با بازده بیشتر برای ساخت یک ردیف تمام فراورده‌هایی القا می‌کند که واقعاً شاخهٔ جدیدی از صنعت شیمی را تشکیل می‌دهند.

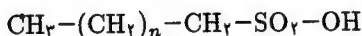
الکلهای چرب «سولفوندار»: بحث بر سر پیدایش فراورده‌های تازهٔ ترکنده و پاکسازی است که بدون کنار گذاشتن فراورده‌های رایج پیش برای کارهای خانگی و کارخانه، پایه‌های تکنیکهای این رشته را کاملاً عوض کرده‌اند.

علاوه بر تولید سنتی صابونها، این صنعت قادر شده است که چگونه مواد چرب را چه برای تهیهٔ فراورده‌های مصرفی، و چه برای به‌دست آوردن فراورده‌های تازه مواد فعال در سطح، به راههای گوناگونی تهیه کند. بدین ترتیب، درصدد از میان بردن پیوند دوگانهٔ اسیدهای چرب وارد شده در ترکیب گلیسریدها برآمدند. این اسیدهای اشباع نشده، آسان اکسید می‌شوند؛ و طعم و بوی روغنهای خود را بد می‌کنند. در سال ۱۹۰۱ آقای نورمان<sup>۱</sup> توانست آنها را تحت عمل هیدروژندهی کاتالیزور با فشار قرار دهد. این روش، حدود سال ۱۹۱۰ صنعتی شد و روغنهای خوراکی و نیز صنعتی را هیدروژن دادند. این روغن‌ها به چربیهای نرم تبدیل شدند که بعضی از آنها در ساخت مارگارین (امولسیون چربی در آب یا شیر)، که اصول ساخت آن را آقای ایپولیت مز-موریه<sup>۲</sup> حدود سال ۱۸۷۰ اختراع کرده بود، به‌کار گرفته شدند. مارگارین و فراورده‌های مشابه برمبنای روغنهای گیاهی، که در اواخر سدهٔ نوزدهم بسیار رواج یافت و در همهٔ کشورها موجب وضع مقررات خاصی شد، در تودهٔ مردم مصرف فراوان یافت.

از سوی دیگر، گلیسریدهای دیگری برای اینکه مثلاً در رنگریزی به‌کار گرفته شوند به‌طور خاصی عمل آورده شدند. روغن کرچک که تری گلیسریدی از یک اسید چرب بالای بسیار ویژه، اسید ریسینولئیک است، اگر با اسید سولفوریک عمل آورده شود، به سولفورسینات تبدیل و در آب حل می‌شود.

طی سالهای ۱۹۳۰ توجه آزمایشگاهها، بویژه آزمایشگاههای کارخانه‌های بزرگ آلمان روی خاصیت استرهای سولفوریک که ساده‌تر از مخلوط کمپلکسی بودند که از روغن کرچک حاصل

می‌شد، تمرکز یافت. بحث بر سر نتیجه اثر اسید سولفوریک روی الکلهای چرب با وزن مولکولی زیاد است، فرآورده‌هایی که در آن زمان به اشتباه، الکلهای چرب سولفوندار نامیده می‌شدند. ساختمان این ترکیب طبق فرمول زیر بود:



که در آن  $n$  بین ۶ تا ۲۰ تغییر می‌کرد و جالبترین آنها  $\text{C}_{12}$  و  $\text{C}_{14}$  بودند. زنجیری که اشباع نمی‌شد مربوط به الکل اولئیک ( $\text{C}_{18}$ ) بود.

الکلهای چرب سولفوندار، از نظر صنعتی خواص بسیار جالبی داشتند. آنها که در آب محلول بودند، ترکنده، کف‌کننده و پاک‌ساز بودند، و نیز این مزیت را داشتند که این خواص را در مجاورت نمکهای کلسیم و فرآورده‌های دیگر معدنی محلول در آبهای معمولی، از دست نمی‌دادند. این مجموعه خواص آنها را عوامل مورد نیاز صنایع گوناگونی: مواد پاک‌ساز خانگی و صنعتی، صنایع نساجی، رنگ‌سازی، صنایع پوست و چرم، کائوچوی سنتزی، گرد حشره‌کش و مواد اشتعال‌ناپذیر، شناورسازگردهای معدنی و غیره، ساخته بود.

چشم‌اندازهای کاربرد این نوع فرآورده جالب توجه بودند. اما لازم بود مشکلی را برطرف ساخت. الکلهای چرب طبیعی بسیار کمیاب بودند. لازم بود وسایلی برای تولید آنها با احیای اسیدهای مربوطه یا استرهای آنها یافت. الکلهای چرب بسیار مفید، به شکل استرهای اسیدهای چرب، با وزن مولکولی زیاد، در دسته‌ای از ترکیبات طبیعی، که با گلیسریدها تفاوت دارند (زیرا گلیسرین در آن دقیقاً جای خود را به مونوالکلهای دراز زنجیر سپرده است)، جای دارند و نیز مومی هستند. از میان آنها، اسپرماستی یا موم کافوری، که از سر ماهی عنبر به دست می‌آید، در آن زمان در صنعت داروسازی کاملاً شناخته شده بود.

نخستین وسیله هیدروژندهی موم کافوری، استفاده از نوعی واکنش آزمایشگاهی بود به نام واکنش بووو و بلان، که در آن زمان رواج داشت، که در مجاورت یک الکل معمولی (اتیلک، بوتیلک یا آمیلک) و سدیم انجام می‌گرفت. با این واکنش، الکلات سدیم و هیدروژن نوزاد تولید می‌شدند که استری را که در الکل چرب عمل شده بود، فوراً احیا می‌کردند.

تراست آلمانی I. G. Farben Industrie در سال ۱۹۳۱ امتیاز به‌کارگیری این روش را به ثبت رسانید. این امتیاز مورد اعتراض قرار گرفت زیرا آقایان بووو و بلان در سال ۱۹۰۸ روش خود را در این باره منتشر کرده بودند و در نتیجه امتیاز این تراست باطل شد. اما احیای شیمیایی، دیگر برای این تراست آلمانی چندان سودمند نبود. این مؤسسه روش هیدروژندهی در فشار زیاد و در

مجاورت کاتالیزورها را به ثبت داد که با آن، سیر کردن یا سیر ناکردن پیوندهای اتیلنی، به دلخواه انجام پذیر بود.

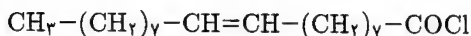
الکلهای چرب «سولفوندار» پایه صنعت نوین مواد پاکسازی را تشکیل می دهند که از استرهای سنتی گلیسرینی که آقای شورول در یک سده پیش آنها را طبق قاعده به دست آورده بود، نیستند. این صنعت در بعضی از کشورها به علت جنگ جهانی دوم متوقف شد و پس از آن بی درنگ گسترش یافت.

مواد جدید فعال در سطح: گستره مواد خام برای ساخت مواد فعال در سطح، باز هم در سایه روشهای نوین ساخت آنها، که در رشته های دیگر صنعت شیمی رواج داشتند، بازتر شد. در همان زمانی که ساخت الکلهای چرب بالا آغاز شد، نوعی ماده پاکسازی، بسیار متفاوت از مواد پیشین، در سال ۱۹۳۱ به نام Igepon T بوسیله I. G. Farben Industrie به بازار آمد.

یکی از مواد اساسی آن، اتیلن بود که در آن زمان با هیدروژندهی دقیق استیلن به دست می آمد و تولید آن از کربور، اقتصادتر بود. برای آغاز اکسایش اتیلین به اکسید اتیلن با فرمول  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  که بسیار واکنش پذیر است، روشهای گوناگونی در آن زمان شناخته شده بودند. بویژه در مجاورت بی سولفیت سدیم، اکسید اتیلن ترکیبی افزایشی می دهد که بنیان الکل آن روی متیل آمین اثر می گذارد. در اینجا حذف یک مولکول آب و تشکیل یک ترکیب آمینی کمپلکس



این آمین که در مجاورت سود بر کلرور اسید اولئیک:



اثر می گذارد با حذف کلرور سدیم و آب، تشکیل مشتق سولفوندار از آمید با زنجیر طویل اتیلنی می دهد. اما این فراورده که با نام ponT<sup>۱</sup> فروخته می شود اولین ترکیب از ردیف بلندی است که خواص ترکندگی، کفکنندگی، پاکساز و مولسیون کننده آن در بها را بروی صنایع گوناگونی گشوده است.

این نمونه دنباله طولی از واکنشها، که بر مبنای یک هیدروکربن ساده، اتیلن، و ماده ای که از یک جسم طبیعی، اسید اولئیک گرفته شده است قرار دارند، نشان می دهد که در سالهای ۳۰، همان تکنیکی که گرایش به عصر سنترهای بزرگ صنعتی داشت به چه اوجی دست یافته بود. مواد خام طبیعی، گرچه بتهایی به کار گرفته می شدند می توانستند رشد ساخت مواد فعال در سطح را محدود کنند، زیرا فراورده هایی با گوناگونی روزافزون و کاملاً شناخته شده به بازار می فرستادند

سطح را محدود کنند، زیرا فراورده‌هایی با گوناگونی روزافزون و کاملاً شناخته شده به بازار می‌فرستادند و نیز انگیزه افزایش تقاضای صنایع مصرفی بودند. در آن زمان روشهای کلاسیک عمل آوردن مواد چرب سنتزی، استخراج و خالص کردن اجزای سازنده آنها و استفاده از آنها در اشکال شیمیایی بسیار گوناگون، هنوز دور از دسترس بود؛ اما چنانچه کارایی روشها پیوسته بیشتر نمی‌شد، منابع فراورده‌های طبیعی نمی‌توانستند پاسخگوی اشتیهای روزافزون صنایع تبدیلی باشند.

در واقع، گرچه تکنیکهای صنایع اخیر، پیوسته در تحول بودند، چشم‌اندازهای ذخیره مواد خام نیز چنین می‌نمود که به‌طور پایان‌ناپذیری گسترده می‌شوند. منابع نوینی برای صنعت هیدروکربنهای پارافینی طبیعی یا سنتزی یافت شدند.

تکنیکهای جدید چاره‌کاری نفتها، کراکینگ گرمایی و بعد کراکینگ کاتالیزوری که در سالهای ۳۰ و ۴۰ به‌کار گرفته شدند (رجوع کنید به صفحه ۸۴)، دستیابی به مقادیر چشمگیر هیدروکربنهای اتیلنی با وزن اتمی نسبتاً کم (اتیلن و همرده‌های بالاتر) را کاهش دادند. وانگهی فراورده‌های مشابهی برمبنای زغال (حتی بسیار فقیر) و بخار آب با روشهای سنتزی آقایان ف. فیشر و ه. تروپش<sup>۱</sup> با صبر و بردباری در سالهای ۱۹۲۳ تا ۱۹۳۵ به‌دست آمدند که بعداً به آنها خواهیم پرداخت.

در اواخر سالهای ۴۰ برای تهیه الکلهای چرب سنتزی روشهای گوناگونی در صنعت، مورد استفاده قرار گرفت که یا بر پایه عمل آوردن هیدروکربنهای اشباع نشده به توسط مخلوطی از CO و هیدروژن در مجاورت کاتالیزورگر، اکسوسنتز، یا واکنش اکسو، در ممالک متحده امریکا بود یا با تهیه مستقیم آن در نسبت ۵۰ یا ۶۰٪ به توسط نوعی روش فیشر - تروپش با نام سینتول Synthol در آلمان. باز می‌توان گفت که ساخت سولفاتهای آلکیلی (نام کنونی به‌جای نامهای غلط الکلهای چرب سولفوندار) نیز با راههای تازه تولیدی انجام گرفته است. مثلاً اولفینهای (کربورهای اشباع نشده) راست زنجیر بدون شاخه، که در کراکینگ پارافین (کربورهای اشباع شده) به‌دست می‌آیند می‌توانند مستقیماً یک مولکول اسید سولفوریک را روی پیوند دوگانه تثبیت کنند؛ و بدین ترتیب، بدون اینکه از پیش، یک بنیان الکل روی زنجیر به‌وجود آمده باشد، سولفات آلکیل ثانوی بدهند. اختراع به ثبت رسیده شل در امریکا در سال ۱۹۵۰ به یک ماده پاک‌ساز مربوط می‌شد که به نام تیپول teepol به بازار آمد و با روش بالا ساخته می‌شد. در این دوران دیده شد که ساخت این ترکیبات، موقعیتی برای ارزش یافتن مواد جانبی صنایع نفت فراهم آورد.

**Surfactant** یا **tensio-actifs**: در سالهای ۱۹۳۰ و ۱۹۶۰ مفهوم مواد پاک‌ساز بزودی برای معرفی تعداد روزافزون فراورده‌های صنعتی که از آزمایشگاههای کارخانه‌های بزرگ بیرون می‌آمدند و نیز منظور داشتن مشخصات هر یک از آنها، نارسا تلقی شد. این پیامد دیگری از این گسترشها، و تشکیل یک رشته فنی - دانشی تازه‌ای بود و می‌بایست نامی برای آن بیابند که همگان آن را بپذیرند. مفهوم **agents tensio-actifs** (مواد فعال در سطح) در آغاز در فرانسه به موادی گفته می‌شد که سطح آنها فعال باشد، سپس در آلمان به فعالیت موئینگی توجه شد و در ممالک متحد امریکا، اصطلاح **surface-active-agents** را پذیرفتند که واژه **surfactants** از آن ساخته شد. رشته‌ای که با این عناوین گوناگون تشکیل شد بر روی چند پایه از شیمی و فیزیک عمومی قرار داشت. هدف آن گسترش دادن و تحکیم این پایه‌ها با کوشش در تعریف رفتار مولکولی مواد موجود در سطح مشترک مایع - مایع، و نیز مشخص کردن نوع و کنترل خواص ویژه آنها: حلالیت، پایداری شیمیایی در حلال، قدرت ترکندگی، امولسیون شوندگی، پاشیدگی، کف‌کنندگی، پاکسازی و غیره، و نیز آثار زیست‌شناسی آنها بود.

این ترکیبات را برپایه رفتارشان در محلول رده‌بندی کرده‌اند. ترکیباتی که کمتر فعال هستند مهمترین ردیف را تشکیل می‌دهند و شامل نمکهای قلیایی اسیدهای چرب، سولفاتهای قلیایی، روغنهای سولفوندار و فراورده‌های دیگری مانند آمیدها و مشتقات سولفوندار کربیدهای آروماتیک متصل به کربیدهای آلیفاتیک می‌شوند. در رده ترکیبات دارای کاتیونهای فعال، آمیدها، بویژه کلوروهای آمونیم جای دارند که در آنها نیتروژن چسبیده به زنجیرهای راست‌خط یا حلقه‌ای است. سرانجام، در رده ترکیبات یون ناشونده، بویژه مشتقات اکسید اتیلن جای دارند.

یک نامگذاری جدید و نیز نمایش گرافیکی ساده‌ای از مولکولهای فعال انجام گرفته است. این رشته نخستین گسترش خود را در اواخر سالهای ۴۰ داشته است و مانند دیگر رشته‌های جوان، مفاهیم کلی، گفتار و نوشتار مربوط به آنها در دهه‌های بعد، همواره دستخوش تحول بوده‌اند.

### زیست‌شناسی و صنایع شیمیایی

نمونه بسیار جالب دیگر از تنوع کوششهای صنعتی در نیمه نخست سده بیستم، آغاز و گسترش سریع زیست‌شیمی و داروسازی است. در این زمینه، روشها بسیار گوناگون و متمایز از یکدیگر هستند، اما خط مشترکی بین خود دارند. همه آنها نتیجه بررسیهای آزمایشگاهی برای جداسازی ترکیبات مواد طبیعی تشکیل‌دهنده جوهره فعال آنها از لحاظ پزشکی و تکثیر مصنوعی آنهاست.



با آغاز این سده، شیمیدانها در برابر خود تعداد روزافزونی از ترکیباتی را یافتند که فرمول شیمیایی آنها چنان با یکدیگر متفاوت هستند که برای تولید دوباره آنها همه منابع آنالیز و سنتز شیمیایی باید به‌کار گرفته شوند. به نسبتی که زیست‌شیمی توان می‌یافت در افزایش منابع آزمایشگاهی بقصد دستیابی به مراحل تازه جهت استخراج، خالص کردن و دوباره‌سازی این ترکیبات فعال، تلاش بیشتری انجام می‌گرفت. بنابراین، نخستین آگاهیه‌های زیستی به انگیزه بسیار نیرومندی برای پیشرفت خود دانش شیمی تبدیل شد. بدین ترتیب، نخستین ساختهای صنعتی دارو پدید آمد و با گذشت چند دهه، نه تنها اهمیت اقتصادی فراوان یافت، بلکه در سلامت گروه‌های وسیع توده مردم و نیز تحول دموگرافیک کل جهان تأثیر اساسی بر جای گذاشت.

در واقع روابط شیمی و داروسازی بسیار قدیمی است و از سده نوزدهم، که نخستین الکاوتیدها از گیاهان مربوطه گرفته شدند، نشأت می‌گیرد. در سده شانزدهم، پاراسلوس و شاگردان وی کاربرد مواد معدنی را به عنوان دارو و در جنب فرآورده‌های طبیعی سنتی دارای منشأ گیاهی یا حیوانی، پایه گذارند. شیمی دارویی به مدت دو سده در خود علم شیمی نقش اساسی داشته است. ترکیبات گوناگون معدنی که کاتالوگ شیمیدانها را غنی کرده‌اند در آزمایشگاههای داروسازانی کشف و تولید شدند که تا پایان سده هجدهم، جز در چند مورد، تنها به ساخت نمکها و ترکیبات شیمیایی خشنود بودند.

از جمله تغییرات اولیه‌ای که در سده نوزدهم طرح‌ریزی شد، از یکسوی کاربرد داروی بیهوشی، و از سوی دیگر ساخت تب‌برها و داروهای ضد درد بود.

قدرت بیهوش‌کنندگی بعضی داروهای شیمیایی تقریباً در همان زمانی که شناخته شدند تبلیغ شد. از این زمره داروها، پروتوکسید نیتروژن  $N_2O$  بود که گاز خنده‌آور نام دارد، و حدود سی سال پس از کشف آن به وسیله پرستلی، در ادامه تجربیات دیوی به‌کار گرفته شد. در سال ۱۸۴۴ از این گاز برای نخستین بار برای کشیدن دندان در انگلستان استفاده کردند. دو سال پس از آن، اتر سولفوریک بنوبه خود در ممالک متحده آمریکا برای همین کار در جراحی غده‌ها به کار گرفته شد. که در زمان خود، کشف بزرگی در جراحی بود.

کاربرد کلروفرم نیز سرگذشت مشابهی دارد. در سال ۱۸۴۷ در زایمان به‌کار گرفته شد و زمانی که آقای جان اسنو در سال ۱۸۵۳ از آن در جراحی ملکه ویکتوریا استفاده کرد، کاربرد آن قانونی شد. همه این ترکیبات، در آغاز، مصرف چندانی نداشتند. کاربرد آنها به عنوان داروی بیهوش‌کننده، در گرو روشهایی بود که آنها را بدون هر گونه ناخالصی، تهیه کنند. این توفیق به‌طور کلی حدود ۱۸۷۰

به‌دست آمد. در این زمان کاربرد داروهای ضد عفونی نیز؛ در پی کارهای آقای پاستور آغاز شده بود. پس از اینکه آقای جوزف لیستر در سال ۱۸۶۷ جهت احتیاطهای لازمه در جراحی عفونتهای میکروبی، فنول را به‌کار برد این ماده به‌عنوان رایجترین ماده ضد عفونی به‌کار گرفته شد.

شیمی برای فراورده‌هایی که به نیازهای جدید پاسخ می‌دادند آغوش خود را کاملاً باز کرده بود. از جمله این فراورده‌ها در نیمه دوم سده نوزدهم می‌توان از: ترکیبات معدنی نظیر کلریدهای روی یا جیوه، اسید بوریک، پرمنگنات پتاسیم یا ترکیبات آلی از قبیل یدوفرم، تیمول، اسید سالیسیلیک نام برد. ساخت صنعتی اسید سالیسیلیک، پس از سال ۱۸۴۷، زمانی که آقای کوله روشی را برای ساخت آن از فنول کشف کرد، بود، بدون شک نخستین تولید صنعتی فراورده‌های دارویی به‌شمار می‌رود. اما خواص تب‌بر آن تا سال ۱۸۷۵ کشف نشد. داروسازی از همان آغاز سده نوزدهم الکل‌وئیدهای خالصی در اختیار داشت: مورفین که آقای زرتورنر<sup>۱</sup> در سال ۱۸۰۶ آن را از اوبیوم به‌دست آورده بود؛ کینین که در سال ۱۸۲۰ بوسیله آقایان پ. ژ. پلتیه و ژوزف کاوناتو<sup>۲</sup> شناخته شد؛ و کمی بعد، سنکونین و دیگر الکل‌وئیدهای گنه‌گنه؛ پاپاورین در ۱۸۵۰؛ و کوکائین به‌وسیله نیمان<sup>۳</sup> در ۱۸۶۰ و غیره.

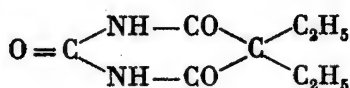
نخستین ساخت داروهای شیمیایی: تولید سیستماتیک و نیم صنعتی همه این الکل‌وئیدها از همان آغاز کشف آنها شروع شد و گیاهان بومی حامل آنها، ارزش اقتصادی زیادی یافتند. علاوه بر این، نخستین تولید آنها سبب شد که هدفهای صنعت داروسازی تغییر کند و به‌سوی مقاصد صنعت شیمی گرایش یابد.

زمانی که شیمی‌دانهای آلمان نخستین مواد ضددرد را با روش سنتز ساختند، گام بزرگی به پیش برداشته شد. این پیروزی بسیار سریعی بود که در سایه کاربرد اسید سالیسیلیک به‌عنوان ماده اصلی به‌دست آمد. در سال ۱۸۸۴ آقای کنور<sup>۴</sup> توانست استری از اسید سالیسیلیک را با یک هیدرازین تراکم دهد و مشتقی از پیرازولون به‌دست آورد که بی‌درنگ با نام آنتی‌پیرین وارد بازار شد. مشتقی از این ماده سبب شد که کارخانه هوخست داروی دیگری از همین خانواده بسازد. این دارو - پیرامیدون تقریباً در همان زمانی ساخته شد که آقای کاله<sup>۵</sup> نخستین مشتق آنیلین با خاصیت ضددرد را، که داروی ضدتب بود، از اثر اسید استیک در گرما تهیه کرد. کمی پس از آن، بایر مشتق دیگری از آنیلین، فناسنتین، را ساخت.

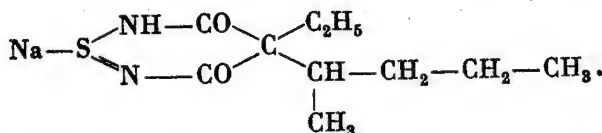
از سوی دیگر، در سال ۱۸۷۵، خواص اسید سالیسیلیک تا حدودی مشخص شده بود و آقای بایر پس از یک رشته بررسی، در سال ۱۸۹۹ با استیل سالیسیلات سود، آسپیرین را ساخت، که نخستین

داروی خنک‌کننده‌ای بود که مستقیماً از اسید سالیسیلیک مشتق می‌شد و رده تازه‌ای از داروهای سنتزی را در جنب داروهای بلافاصله پیش از آن، مشتقات پیرازولون و مشتقات آنیلیدها، ایجاد کرد. همه این نوآوریهای شیمیدانهای آلمان، سبب شد که شیمی دارویی سریعاً جزء شیمی صنعتی شود. این نکته ناگفته نماند که در این دهه، مؤسسات بزرگ تولیدی شیمی بودند که مواد خام را برای تولیدهای دیگر خود در اختیار داشتند، و شروع به استفاده صنعتی از داروهای جدید صرفاً شیمیایی کرده بودند و آنها را در سراسر جهان، پخش می‌کردند.

آغاز شیمی درمانی: از پایگاه این بررسی‌ها، به پهنه مسایل دیگر دارویی شتافتند. ترکیب پارآلدئید در سال ۱۸۸۲ به عنوان داروی خواب‌آور ساخته شد. این ترکیب، بسیاری از استالدهید  $\text{CH}_3\text{—CHO}$  و از سه مولکول این جسم بسیار ساده، تشکیل شده است. آقای امیل فیشر، بیست سال بعد، سنتز نخستین بار بیتوریک (ورنال) را انجام داد. برای این کار یک مشتق دی‌اسید، اسید مالونیک را با اوره متراکم ساخت. ورنال با فرمول زیر:



با تعویض یکی یا هر دو گروه  $\text{C}_2\text{H}_5$  آن با گروههای دیگر، انواعی از تبدیلات آن تولید می‌شود. این خاصیت، از همان آغاز این سده، ساخت تعداد زیادی بار بیتوریکها با خواص آرامبخش و خواب‌آور بسیار خوبی را ممکن ساخت. یکی از نوآوریهای اخیر مربوط به پایان سالهای ۴۰، به اصطلاح سرور راستگویی یا پنتوتال است که نمکی از سدیم یک تیوره می‌باشد:



معلوم است که در جنب بار بیتوریکها، رشته شیمی درمانی رفته‌رفته ردیفی طولانی از ترکیبات وابسته به بسیاری از گروههای دیگر شیمیایی و نیز مخلوطهای مناسبی برای تهیه یک زردخانه عظیم از داروهای شیمیایی را به‌کار گرفت، که مشتریان آن روزافزون هستند. رده‌های بزرگ دیگر فرآورده‌ها در سالهای ۳۰ تا ۴۰ این سده در سایه گسترش زیست‌شیمی و میکروب‌شناسی پدید آمدند.

یکی از رده‌های بسیار پرثمر، در همان آغاز سده، پس از کارهای زیست‌شناسان متعدد و بویژه

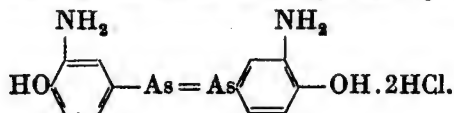
کارهای آقای پاول ارلیش<sup>۱</sup> و برتاین<sup>۲</sup> ساخته شدند. آقای ارلیش که در بیماریهای عفونی مالاریا و سیفلیس مطالعه می‌کرد درصدد به‌کار گرفتن ترکیبات شیمیایی بسیار قوی - اما بدون زیان برای بدن بیمار - برای کشتن باکتریها بود.

رشته درمان با سروم که در سال ۱۸۹۰ با تهیه سروم ضددیفتی آقای امیل ادولف فون برینگ<sup>۳</sup> آغاز شد بیدرنگ از سوی مؤسسه آلمانی Farbwerke Hoechst مورد استقبال قرار گرفت؛ گرچه ناتوانی این رشته در درمان بیماریهایی که ناشی از باکتریهای بدون ترشح با دتن هستند، معلوم شده بود.

آقای ارلیش در آغاز، فراورده‌های رنگی را، پس از اینکه مشاهده کرد که آنها روی بعضی از بافتهای سلولی تثبیت می‌شوند، نه روی همه بافتها، مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۸۹۱ تأثیر آبی متیلن را روی باکتری ترپوم، که مگس سه‌تسه حامل آن است شرح داد. تحقیقات وی در همین راستا، مدت پانزده سال ادامه یافت. حدود سال ۱۹۰۶ وی مشاهده کرد که بعضی رنگ‌ها از نوع دی‌آزو، بر روی ترپوم تأثیر دارند، اما نتایج بسیار خطرناکی برای بیمار به‌بار می‌آوردند. بعدها بدین نتیجه رسیدند که از این خطر کردن صرف‌نظر کنند. وی اندیشید که از مشتقات ارسنیکی آنیلین استفاده کند و در سال ۱۹۰۷ نخستین موفقیت را با به‌کار بردن اتوکسیل با فرمول  $\text{NH}_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{AsO}_3\text{HNa}$  به‌دست آورد.

مشتقات ارسنیکی آروماتیک، از زمانی که آقای بشان در سال ۱۸۶۳ نخستین اسیدهای ارسونیک را با فعل‌وانفعال اسید ارسنیک روی آنیلینها و فنولها به‌دست آورد، شناخته شده بودند. این ترکیبات با جست‌وجوهای ساده آزمایشگاهی، به همت آقای ارلیش به پایه‌های رشته شیمی درمانی و بنابراین به مبانی ساختهای نوین صنعتی تبدیل گردیدند.

آقای ارلیش و همکارش هاتا<sup>۴</sup> در سال ۱۹۱۰ با تهیه سالوارسان ۶۰۶، نخستین داروی مؤثر ضدسیفلیس، به یکی از بزرگترین اکتشافات در این زمینه دست یافتند. این دارو، ترکیب بسیار کمپلکسی است که در آن دو اتم ارسنیک، دو مولکول اسید ارسونیک را به یکدیگر متحد ساخته‌اند،



بدین ترتیب، خانواده مهمی از مشتقات، بسرعت وارد بازار شدند.

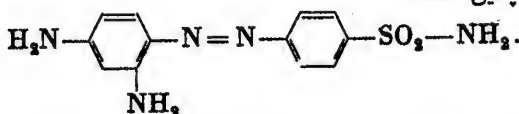
در ادامه تحقیقات دانسته شد که اثر سالوارسان، قطعی نیست و بازگشت بیماری را باید در

P. Ehrlich (۱۸۵۴ - ۱۹۱۵): میکروب‌شناس آلمانی.

مواردی با درمان دراز مدت سرکوب کرد که در این حالت باید جیوه یا بیسموت هم به‌کار برد. کارهای مقدماتی روی آنتی‌بیوتیکها: دارویی که لااقل مدت سی سال است درمان نه‌تنها بیماری سیفلیس بلکه شمار زیادی عفونتها را ممکن ساخته و خصوصیت عامل ضد عفونتهای کلی را دارد، پنی‌سیلین است که در دوران جنگ جهانی دوم به‌دست آمد.

در واقع اثر آنتی‌بیوتیکی که بوسیلهٔ *penicillium notatum* تراوش شده است، تصادفاً در سال ۱۹۲۸ مشاهده گردید و سپس آقای الکساندر فلمینگ، استاد باکتری‌شناسی دانشگاه لندن آن را به سنجیدگی بررسی کرد. آقای فلمینگ پس از سه یا چهار سال تحقیق توانست میکروبهایی را که پنی‌سیلین روی آنها تأثیر دارد معین کند و متوجه شد که این تأثیر سمی کاری به بدن جاندار و گلیولهای سفید ندارد. او وسایلی برای پیگیری تحقیقاتش و جداسازی این فراورده و بویژه تثبیت آن برای کاربرتش در داروسازی در اختیار نداشت. در طی سالهای ۱۹۳۲ - ۱۹۳۹ هیچ تحقیق دیگری روی این آنتی‌بیوتیک طبیعی انجام نشد.

سولفامیدها، آنتی‌بیوتیکهای شیمیایی: بالاین‌حال، در این فرجهٔ زمانی توجه شیمی‌دانان - زیست‌شناسان از نو معطوف اثر ضدباکتری بعضی مواد رنگی شد. این توجه پس از آن بود که آقایان: دوماک<sup>۱</sup>، کلورر<sup>۲</sup>، میتزش<sup>۳</sup> توانستند از بنزن سولفامیددار، مشتق دو نیتروژنی به‌نام پرونتوزیل بسازند، که فرمول آن چنین است:

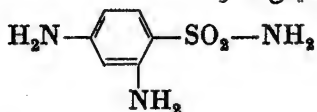


پرونتوزیل که در باکتری‌شناسی برای رنگ کردن به‌کار می‌رود تقریباً بیدرنگ خود را به‌عنوان یک عامل بسیار مؤثر سترون‌کنندهٔ باکتریها نشان داد. در همان سال پیدایشش، (۱۹۳۵) گروه انسیتو پاستور باریس، شامل آقایان تره‌فول<sup>۴</sup>، نیتی<sup>۵</sup>، و بوه<sup>۶</sup> برای نخستین بار تأثیر آن را روی تعداد زیادی از باکتریها، از آن جمله: استرپتوکوک، مننگوکوک پتوموکوک، گونوکوک به نمایش گذاردند.

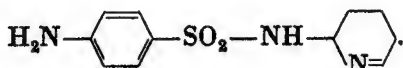
بزودی ثابت شد که سولفامیدها باکتریها را از بین نمی‌برند بلکه مانع تکثیر آنها می‌شوند. مؤسسه آلمانی I.G. Farben Industrie که ساخت آنها را شروع کرده بود و کارشناسان آن، که در بین آنها کسانی بودند که سنتز پرونتوزیل را انجام داده بودند و گمان می‌بردند که به نوعی آنتی‌بیوتیک دست یافته‌اند، این داروهای تازه را در مقیاس بسیار زیادی برای فروش تبلیغ کردند. مثل سایر موارد، با دستکاریهای مختصری در فرمول، سولفامیدها دارای آثار گوناگون شدند و انواع

آنها بسرعت چنان افزایشی یافت که آزمایشگاههای همهٔ مؤسساتی در این کار فعال بودند تمامی کوششهای خود را بی‌دریغ به تحقیق در این زمینه تمرکز دادند.

از میان فراورده‌های تبلیغی که با نام تجاری Septoplix یا 1162 F ساخت آقای ارنست فورنو بسرعت مشهور شدند، فرمول سادهٔ زیر را می‌توان به نمایش گذارد:



این ترکیب پارا آمینوبنزن سولفامید، فراوردهٔ تجزیهٔ پروتوزیل در موجود زنده (*in vivo*) هم می‌باشد؛ با جانشین کردن یک حلقهٔ پیریدین به جای یک اتم هیدروژن، ترکیب داژنان Dagénan از آن مشتق می‌شود:



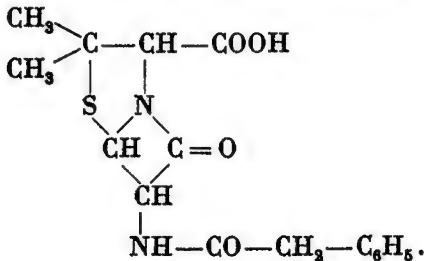
تولید سولفامیدها طی چند سال در کشورهای تولیدکنندهٔ آن به میلیونها تن رسید. تجویز انبوه سولفامیدها در موقعیتهای بسیار متفاوت به شکل استعمال داخلی یا خارجی، موجب شد که سریعاً باکتریهای مورد نظر پاسخ دهند. اثر آنتی‌بیوتیکی سولفامیدها نتیجهٔ این واقعیت است که در محیط رشد باکتریها، سولفامید جانشین ترکیبی می‌شود که ساخت نسبتاً مشابهی با آن دارد، یعنی اسید پارا آمینوبنزویک  $\text{CO}_2\text{H}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2$  که در حقیقت ویتامین H رشد موجودات ذره‌بینی است. پاسخ این موجودات، لااقل برای بعضی از آنها، طی نسلها، سازگاری با شرایط جدیدی است که به آنها تحمیل شده است؛ یعنی تبدیل شدن به نژادهای مقاوم در برابر سولفامیدها.

جداسازی آنتی‌بیوتیکهای طبیعی ... شیمی‌درمانی ناگزیر از یافتن سلاح تازه‌ای بود، بدین جهت، نخست در انگلستان، بعداً در سالهای ۱۹۴۱ تا ۱۹۴۳ در ممالک متحدهٔ امریکا، گروههای پژوهشی، به ریاست سر هاوارد فلوری<sup>۱</sup> در آکسفورد، گروه آزمایشگاه فدرال تحقیقات کشاورزی در پیوریا<sup>۲</sup> (ایلینوی)، مطالعه روی پنی‌سیلین را آغاز کردند. آقای فلوری، چین<sup>۳</sup> و همکاران آنها در سالهای ۱۹۳۹ - ۱۹۴۱ پنی‌سیلین را به صورت خالص به دست آوردند و وسیله نگاهداری آن را یافتند و بررسی‌های کلینیکی روی آن را شدت دادند. اما در زمان جنگ، منابع بریتانیای کبیر برای ایجاد روشهای تولید صنعتی آن در مقیاس فراتر از تولید طبیعی این ماده، کافی نبودند. سابقهٔ تهیهٔ آنزیمها اولیه در مقیاس صنعتی، بزحمت به بیست سال می‌رسید و سابقهٔ ویتامینها و هورمونها از

این هم کمتر بود. پیش‌بینی می‌شد که مقدار کاربرد آنها در آینده بسیار کمتر از آنتی‌بیوتیک‌ها طبیعی باشد. در سال ۱۹۴۱ فلوری محافل علمی و صنعتی آمریکا را بر آن داشت که گسترش آن را شروع کنند. آنتی‌بیوتیک‌ها در این مرحله از تحقیقات، به‌عنوان یک فراورده جنگی با اهمیتی برابر الیاف جدید و مواد سنتزی (که صنعت آنها را دیگر تهیه می‌کرد)، انرژی هسته‌ای یا کامپیوترها (که تازه شناخته شده بودند) تلقی می‌شدند.

بحث بر سر گسترش آنها در تجهیزات صنعتی با ابعاد بزرگ، کشت نوعی قارچ، یافتن روش‌هایی برای خلوص قابل قبول، سپس تبدیل و تکمیل آنها در محیطی کاملاً دور از عفونت، برای حفظ خلوص فراورده‌های نهایی بود. این وظیفه طی دو سال بوسیلهٔ مؤسسات امریکایی در سایهٔ قدرت صنعتی آنها که کوشش‌های زمان جنگ پشتیبان آن بود، انجام گرفت. چنانچه شرایط زمان جنگ وجود نداشت، چنین کاری بی‌تردید یک یا چند دهه زمان می‌گرفت.

... و سنتز آنها: فرمول پنی‌سیلین از نقطه نظر شیمی، لااقل به‌طور تقریبی، معلوم شد، سپس فرمول دقیق آن را تعیین کردند:

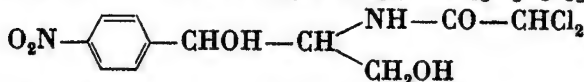


در واقع در روی این نمایه، فرمول پنی‌سیلین‌های گوناگونی یافت شده است که تفاوت آنها به بنیانهای ثابت شده روی گروه  $\text{NH} - \text{CO}$  برمی‌گردد. بنزیل پنی‌سیلین، که در بالا آورده شده است، تنها پنی‌سیلینی است که در درمان به‌کار می‌رود.

سنتز پنی‌سیلین در سال ۱۹۴۴ عملی شد. فرمول آنتی‌بیوتیک‌های دیگر جدا شده، در همان زمان یا کمی بعد، باکتری‌های گوناگون، جلبک‌ها یا قارچ‌ها بیدرنگ مشخص شدند: برای تیروتریسین که از *bacillus brevis* استخراج می‌شود از سترپتومایسین آکتینومایست‌ها و غیره. آنها کم و بیش کمپلکس بوده و همواره با هم یا با خانواده‌های بزرگ تفاوت زیاد دارند. در واقع با وجود موفقیت در سنتز شمار فراوانی از آنها، آنتی‌بیوتیک پایه، تقریباً همیشه از یک موجود زنده طبیعی به‌دست آمده است و با طی بیست سالی، شیمی‌دان‌ها یاد گرفتند که چگونه روی عامل‌های گوناگون شیمیایی مولکول‌های آن، برای گسترش ردیف داروهای تولیدی خود دخل و تصرف کنند.

کلرومایستین، که علیه تیفوس داروی مؤثری است از آنتی‌بیوتیک‌هایی است که حدود ۲۰ سال

پیش (حدود سال ۱۹۵۸) ساخته شده است. مراحل اجرای این سنتز، نمایش بسیار جالبی از مهارت‌هایی است که کارشناسان شیمی آلی، واکنش‌های بنیادینی را که در بیش از یک سده پیش کشف شده بودند برای عبور از مولکول ساده بنزن به فرمول زیر، مورد استفاده قرار دادند:



در این مورد ده عمل پایایی انجام می‌گیرد که از واکنش فریدل و کرافتس آغاز می‌شود و به بروم‌دار کردن، نیتروژندار کردن، و به دنبال آنها استیلدار کردن، احیا، هیدرولیز و غیره می‌کشد. در این عملیات دیگر اثری از تهیه گاه‌گاهی یک ترکیب شیمیایی جهت رفع نیاز آزمایشگاه نیست، بلکه تولید منظم دارو مورد نظر است. بدین ترتیب، می‌توان تصور کرد که تکنیک شیمی صنعتی، از نظر کیفی و کمی، از زمان پیدایش نخستین رنگ‌های صنعتی در سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۸۶۰ تا چه اندازه به پیش رفته است.

باید در نظر گرفت که صنعت داروسازی در سال ۱۸۹۰ با دشواری تازه‌ای برخورد کرد که به خلوص و فسادناپذیری فراورده‌های آن و همچنین شرایط پخش بازرگانی آنها مربوط می‌شد: این دشواریها تنها با نزدیکی و تمرکز وسایلی برطرف می‌شدند که صنعت شیمی از تکنیکهای دیگر، با همین خلاقیت و تحول سریع اقتباس کرده بود.

تواناییها و ناتوانیهای شیمی باکتریشناسی: همان‌طور که در مورد سولفامیدها گفته شد، چنین می‌نماید که به نسبتی که بدن انسان در اثر تجویزهای مکرر این داروها، به آن آغشته می‌شود، توان حمایتی این داروها کاهش می‌یابد. استعداد باکتریها در تطبیق خود با عواملی که تکثیر آنها را بشدت متوقف می‌سازند سبب کشف پدیده‌ای شد که تا آن زمان شناخته یا لااقل تا این اندازه قطعی نبود. وانگهی این تنها بن‌بست (پارادوکس) کار شیمیدانها، که در همه زمینه‌ها به تولید صنعتی روی آورده بودند، نبود. ما از فراورده‌های احتمالی باقیمانده صنعت نفت برای کشت مواد نیتروژندار مصرفی سخن نخواهیم گفت. این کشت ظاهراً زمانی به سودآوری تجارتي خواهد انجامید؛ اما این زمانی است که توده‌های مردم را کمی مواد خوراکی منابع سنتی کشاورزی و دامپروری تهدید کند. با این وجود، نویسندگان داستانهای علمی و استنتاجات اشخاص بدبین، هنوز بدان نپرداخته‌اند و چند برداشت پروتیدهای باکتری - نفتی تا به امروز تنها به‌عنوان مکمل خوراک دام به‌کار رفته‌اند. باین‌حال، فراورده‌های صنایع بزرگ و کنونی شیمی به تکثیر برخی ناراحتیها و خطرات برای انسان انجامیده‌اند.

میزه حیوانات شکارچی، دود، گاز، آبها ردیف نخست این فهرست را اشغال کرده‌اند، اما این



پدیده تازه‌ای نیست. کاربرد زغال سنگ برای گرم کردن خانه‌ها در سده هجدهم در لندن ممنوع اعلام شد. بعداً فزونی یافتن منابع فضولات، خرابیها را تشدید کرد، و با قوانینی کوشیدند تا آثار آن را محدود سازند؛ اما قانون همیشه پشتیبان منابع خصوصی یا پشت سر دولت بوده است.

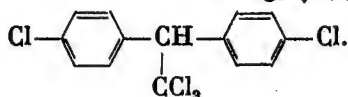
خسارتهای ناشی از افزایش آخالهای غیرمخرب، نظیر بسته‌بندیهای پلاستیکی جدید، که کمی بعد، تاریخ آن بررسی خواهد شد از نوع دیگر هستند. زیست‌شیمی، جست‌وجو برای یافتن باکتریایی را که می‌توانند نابودی آنها را هماهنگ با تجمع آنها تأمین کنند شروع کرده است. سرانجام، خطرات ناشی از پایداری شگفت‌انگیز باکتریها در برابر د.د.ت. افکار را بشدت پریشان کرده است. فراورده‌های ضدانگل: قاره اروپا پیدایش این ماده جدید ضدانگل را که ساخته اسلحه متفقین در پایان جنگ جهانی دوم است به یاد دارد. افکار عمومی متقاعد شده بود که با پنی سیلین و د.د.ت. بشریت از این پس، سلاحهایی اختیار دارد که وی را از همه آفتهای جانداري که از همان آغاز پیدایش با آنها دست به گریبان بود، ایمن می‌دارد. اگر صد درصد چنین نبود هم باز ترکیب د.د.ت. به‌عنوان مهمترین پژوهش در شیمی انگل مورد توجه قرار می‌گرفت.

کاربرد فراورده‌های شیمیایی، از جمله ارسنیک یا گوگرد، به‌عنوان حشره‌کش، از زمان باستان رواج داشته است. عصاره‌های گوناگون گیاهی، آب تنباکو، گوگرد بابونه گاوی در گذشته در بعضی از نواحی و بعدها در اوایل سده بیستم، زمانی که ساخت سولفات نیکوتین در امریکا شروع شد در مقیاس جهانی بااهمیت روزافزونی به‌کار گرفته می‌شد. چند بحران کشاورزی، از قبیل بحران مربوط به شیوع حشره آفت سیب‌زمینی در سال ۱۸۶۷ در ممالک متحده امریکا یا بحران مربوط به شته مو در تاکستانهای فرانسه، تولید و فروش فراورده‌های ارسنیک و سولفور کربن را افزایش داد. سولفات مس مخلوط با آهک به اسم جوشانده بوردو به‌عنوان قارچ‌کش به‌کار می‌رفت. حدود ۱۹۳۰ تعویض جوشانده بوردو با اکسی کلورید مس شروع شد. اما مثل همیشه، ترکیبات جدید از بین برنده حشرات و قارچ، سمهای پیشین را تا سالهای ۱۹۳۰، که فراورده‌های سنتزی وارد بازار شدند، بکلی از میدان بیرون نکرده بودند.

از آنجا که هم بدلیل پیشرفت کشاورزی و هم به‌علت افزایش ظرفیتهای حمل و ذخیره‌سازی، نیاز به مبارزه با انگلها بسیار زیاد شده بود، صنایع شیمی، طی نیم سده یکی از شاخه‌های مهم خود را که اصولاً در کار تهیه کانیها و در مقیاس کوچکتري به استخراج مواد طبیعی بود با سرعت زیاد گسترش داد.

در سال ۱۹۳۲ زمانی که قدرت ضدانگلی بعضی ترکیبات آلی سنتزی شناخته شدند، این

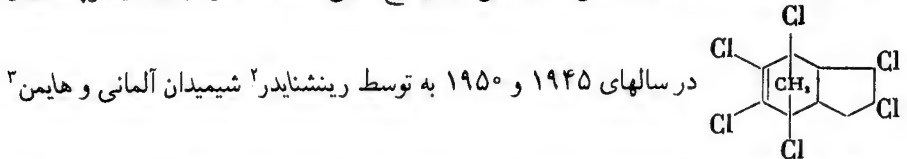
صنعت بکلی چهره دیگری یافت. مؤسسات بزرگ تولیدکننده رنگهای سنتزی نظیر هوخست در آلمان و شرکت ی. ر. گایگی<sup>۱</sup> در سویس مؤسساتی بودند که پیش از دیگران به نتیجه رسیدند. نخستین ترکیبی که در آلمان ساخته شد یا به گروه کربازول - ترکیب نیتروژنداری که در بعضی از اجزای قطرانهای زغال‌سنگ یافت می‌شود - تعلق داشت یا به گروه دی‌آزوها، که مشتقات پیرولیدین یا پیریدین بودند. تنها آزمایشگاه پژوهشی یک مؤسسه صنعتی بزرگ می‌توانست دارای افراد و وسایل فنی لازم برای دستکاری این ترکیبات پایه‌ای باشد و روشهای ساخت عملی را راه‌اندازی کند. د.د.ت.: افتخار کشف این ماده یا قدرت انگل‌زدایی آن به آقای پاول مولر، در سال ۱۸۳۹ برمی‌گردد که در ردیف کارهای مؤسسه گایگی که بویژه در پی‌افتن انگل‌زدای بسیار قویتر از مواد موجود بود، از موفقیت‌های بزرگ است. مشتقات هالوژندار بنزن به‌طور کلی از نظر قدرت ضدانگلی آنها بخوبی شناخته شده بودند. در آن زمان از ترکیب پارا دی‌کلروبنزن در حشره‌کشی استفاده می‌شد، اما تأثیر آن زودگذر بود. آقای مولر پس از تهیه دی‌فنیل‌تری‌کلرانات و دیگر مشتقات بنیان فنیل دست به کار تراکم کلروبنزن با ترکیب کلرال (استالدهید سه کلردار) به کمک یک عامل قوی آزبذای شد و ترکیبی به‌دست آورد که فرمول آن تفاوت چندانی با یکی از اولین فراورده‌های آن نداشت. این ترکیب همانا دی‌کلرودی‌فنیل‌تری‌کلرانات بود که قدرت حشره‌کشی آن از همه اجسام مورد بررسی تا آن زمان، بسیار بیشتر بود. فرمول این ترکیب چنین است:



این ترکیب به نام د.د.ت. و بعدها بانام néocide و اسامی دیگری به بازار آمد د.د.ت. را در سال ۱۹۴۱ گایگی به ثبت رسانید و در سال بعد اجازه ساخت آن به انگلستان داده شد و مؤسسات انگلوساکسون بی‌درنگ به ساخت آن به مقدار زیاد دست زدند تا بتوانند به نیازهای فراوان به حشره‌کشها، که حالت جنگ به وجود آورده بود، پاسخ دهند.

این موفقیت بزرگ سبب توقف این تحقیق نشد. مشتقات هالوژندار دیگری از دی‌فنیل نیز در ردیف د.د.ت. جای گرفتند. طی سالهای جنگ هم ترکیباتی متعلق به گروههای دیگر شیمیایی بررسی شدند. در فرانسه، آقای دوپیر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۴۱، و در انگلستان اسلید<sup>۳</sup> در ۱۹۴۲ هریک جداگانه روی ترکیب سیکلوهگزان کارهایی را شروع کردند که به تهیه مشتق شش کلری از آن به نام lindane یا گامگزان gammexan انجامید. که پس از پایان جنگ، تقریباً در همان زمانی که خانواده‌های انگل‌زدای بزرگ دیگر، نخست در امریکا و سپس در آلمان معرفی شدند، به بازار آمد.

یکی از این خانواده‌ها از استرهای فسفوری تشکیل شده است که گروههای آلکیل آن می‌توانند تغییر یابند و به دستور بایر بوسیله شرادر<sup>۱</sup> شیمیدان آلمانی مورد مطالعه قرار گرفت. خانواده دیگری که دارای کلران chlorane بود و ردیفی از ترکیباتی از این نوع، یعنی مشتقات کلردار دی‌سیلکونپتادیان



در ممالک متحده آمریکا مورد بررسی قرار گرفتند. به علت کمی وسایل، که آلمان در سالهای بلافاصله پس از جنگ از آن رنج می‌برد، امریکاییها بسرعت بازار را تصاحب کردند.

همه این تحقیقات و نیز آنهایی که بعداً انجام گرفتند به تولید انواع فرآورده‌های انگل‌زدایی با ویژگی مطلوب و مورد جست‌وجو در آزمایشگاه انجامید و بسط تازه‌ای به شاخه‌ای از شیمی صنعتی داده شد و مرزهای آن از محدوده مبارزه با انواع انگلها به هر آنچه که انسان به نابود کردن آن علاقه‌مند است گسترش یافت. همان‌طور که معلوم است این عمل تدافعی برای خود انسان هم، گاهی خطر داشته است، اما احتمالاً این فکر هم در کار بوده است که صنعت شیمی به آنجا خواهد رسید که اقدامات تدافعی لازم را بیاید. وانگهی، چنین می‌نماید که هراسی که از سخت جانی ماهیت این انگل‌زدهای سنتزی تا کنون تصور شده است توجیهی ندارد.

کشف ویتامینها: پژوهشهای مربوط به شیمی فیزیولوژی و زیست‌شیمی، در سالهای ۱۹۳۰ منجر به تهیه صنعتی عصاره‌های طبیعی شد، و بعداً بخش بزرگی از ساخت بعضی از این فرآورده‌های سنتزی متعلق به دو گروه بسیار متباین ویتامینها و هورمونها را دربر گرفت.

کشف ویتامینها پیش از کشف هورمونها بود. آقای کازیمیر فونک<sup>۴</sup> فیزیولوژیست لهستانی الاصل در سال ۱۹۱۲ اصطلاح ویتامین را برای معرفی ماده ضدبیماری بری‌بری و ضدالتهاب اعصاب، موجود در شلتوک برنج پیشنهاد کرد. از زمان کارهای کریستیان آیگمان پزشک هلندی در ۱۸۸۹ به‌وجود آن پی‌برده بودند. این عامل زیستی را بعداً ویتامین B<sub>۱</sub> یا آئورین نامیدند. در همین سال ۱۹۱۲، آقای فونک، عامل ضد(اسکوربوت) را که از سال ۱۹۰۷ در غذاهای تازه، سبزیها و میوه‌ها دنبال می‌کردند، یافت، که ویتامین C بود.

بدین ترتیب، در دوره پیش از جنگ جهانی اول و غالباً در پی مشاهدات کلینیکی مربوط به پنجاه سال پیش، دانشمندان فیزیولوژی معتقد شده بودند که شماری از بیماریهای کشنده و بعضی ناتوانیهای عضوی، برخاسته از این بد غذایی‌هایست. همچنین این دوره‌ای بود که شناسایی

1. Schrader 2. Rinschneider 3. Hyman 4. Casimir Funk

نخستین کاتالیزورهای زیستی که در بیشتر تبدیلهای شیمیایی، که در اعضای زنده انجام می‌گیرند، مؤثرند آغاز شده بود. همهٔ این کاتالیزورها را آنزیم، دیاستاز و گاهی مخمرهای محلول نامیدند. در کار آنها، نوعی شباهت با واکنشهای تخمیر وجود دارد از قبیل تخمیرهای الکلی و استیکی که طی سده‌هایی به‌طور صنعتی انجام می‌گرفتند. آقای بوشنر در سال ۱۸۹۷ نشان داد که مخمر آبجو در سلولهای خود، مبنای کارش، نوعی تخمیر الکلی است و بدین ترتیب، ثابت کرد که آن مخمر، تحت تأثیر یک دیاستاز و نه از عامل حیاتی این مخمر، کار خود را انجام می‌دهد. تولیدهای صنعتی بر این مبنا قرار گرفتند.

مجموعهٔ این مشاهدات، پژوهش‌گران را برانگیخت تا ماهیت شیمیایی این عوامل را تعیین کنند. در مورد ویتامینها، که نحوهٔ عمل آنها روی تعادل زیستی فرد زنده، انسان یا حیوان، گویا بسیار دقیقتر است و هنوز کاملاً شناخته شده نیست، در سال ۱۹۱۵، این مفهوم ثابت شد که شماری از عوامل، محلول در چربی هستند، نظیر ویتامین A، عامل رشدی که بوسیلهٔ دو گروه پژوهش‌گر در سال ۱۹۱۵، آیزورن<sup>۱</sup> و مندل از یکسوی، مک کولم<sup>۲</sup> و دیویس از سوی دیگر، شناخته شد و عوامل محلول در آب از قبیل ویتامین B<sub>۱</sub>، ضدبربری و ضدالتهاب اعصاب، که همین پژوهش‌گران در سال ۱۹۱۴ و ۱۹۱۵ به آن نزدیک شده بودند؛ و ویتامین C، ضدآسکوربوت فونک، که آقای کاولند هاپکینز<sup>۳</sup> نیز آن را بررسی کرده بود.

اهمیت زیستی و دارویی ویتامینهای گروه نخست، بخوبی ارزیابی شدند، اما جنگ جهانی گویا کارهای مربوط به آنها را متوقف ساخت. این تحقیقات با آغاز سالهای ۱۹۲۰ دنبال شد. آقای ملانبی<sup>۴</sup> در ۱۹۱۹ گمان می‌برد که باید عامل ضد راشیتسم را با ویتامین A یکی دانست. کمی بعد آن را با نام ویتامین D متعلق به خانواده‌ای از ترکیبات شیمیایی، استرولها، تشخیص دادند و حدود بیست سال بعد، ویتامینهای D همچون نوعی عاملهای زیست‌شیمیایی با اهمیت فیزیولوژیکی بسیار زیاد شناخته شدند.

ماهیت شیمیایی و سنتز ویتامینها: در این زمان می‌دانستند که ویتامینها اجسامی بسیار متفاوت از یکدیگر هستند و تنها رده‌بندی ممکن برای آنها حلالیت در آب و در چربیها می‌باشد. آقایان لوسی راندوان<sup>۵</sup> و هانری سیمونه در سالهای ۱۹۲۲ - ۱۹۲۳ این مفهوم را پیش کشیدند. که ویتامین B تشکیل کمپلکسی از ترکیبات نیتروژنی می‌دهد که ویتامین P (که بعدها، PP شد) جزئی از آن است. آقایان گلدبرگ و تانر<sup>۶</sup> در ۱۹۲۵ متوجه شدند که ویتامین PP ضدبیماری پلاگر است.

1. Osborne 2. McCollum 3. Cowland Hopkins 4. Mellanby 5. Luci Randoin  
6. Tanner

شناسایی ویتامینها و تهیه آنها به شکل خالص از نظر شیمیایی، بی‌درنگ در فاصله میان دو جنگ پیگیری شدند. در سالهای ۱۹۲۲ - ۱۹۲۵ آقایان زوره<sup>۱</sup> و اوزن ویتامین E را که ویتامینی ضدسترونی و محلول در چربی است شناسانیدند، و آقای کارر<sup>۲</sup> سوئسی در سال ۱۹۳۸ برای سنتز آن روشی به دست داد.

آقای سنتاگیورکی<sup>۳</sup> مجارستانی در سال ۱۹۲۸ توانست برای نخستین بار از قشر غده فوق کلیوی، ویتامین C فونک را به شکل خالص به دست آورد و متوجه شد که یک ترکیب نسبتاً ساده اسید آسکوربیک است. پس از تهیه صنعتی آن، بیدرنگ با نام ویتامین C، مصرف فراوان یافت و چند سال بعد، در سال ۱۹۳۴ که آقای رایششتاین<sup>۴</sup> سوئسی، سنتز آن را عملی کرد، مزایای آن به اثبات رسید. ویتامین A که فرمول آن در ۱۹۲۹ به توسط آقایان کولیس<sup>۵</sup> و مور شناخته شد، از همان آغاز مصرف، مقام مهمی به دست آورد. فرمول آن به فرمول کاروتن، که پیش ویتامین آن تلقی می‌شود بسیار نزدیک است. عمل آوردن روغن جگر ماهی در آغاز، پایه ساخت آن شد و در ممالک متحده امریکا گسترش خاصی یافت. بعدها در ۱۹۴۶ سنتز آن و کاروتن در سوئیس عملی شد.

تعیین ساختار شیمیایی ترکیبات نیتروژنی، که گروه ویتامینهای B را تشکیل می‌دهند، پس از کارهای راندوان و سیمونه، سرعت گرفت. پس از آنکه آقایان ویلیام وینت‌هاوز ساختار شیمیایی آنورین، ویتامین B<sub>۱</sub> را معین کردند آقایان آندرساگ<sup>۶</sup> و وستفال در آلمان سنتز آن را عملی کردند (۱۹۳۶). ترکیب لاکتوفلاوین، ویتامین B<sub>۲</sub> را که آقای وارپورک<sup>۷</sup> مشخص ساخته بود گروه آقای ر. کون<sup>۸</sup> در ۱۹۳۳ به شکل خالص به دست آورد و سنتز آن چند سال بعد انجام گرفت. ویتامین B<sub>۶</sub>، آدرمین، همچنین سرگذشتی دارد و در سال ۱۹۳۹ به سنتز آن، در آلمان و امریکا، توفیق یافتند. در همین خانواده، از نقطه نظر زیستی اگر نه از جنبه شیمیایی، ویتامین PP را آقای الوهنین<sup>۹</sup> در ۱۹۳۷ به طور خالص به دست آورد و معلوم شد که امید اسید نیکوتینیک است. آن هم از راه سنتز ساخته شد و حیطه درمانی آن بسیار فراتر از درمان پلاگر است. یک ویتامین P با تراوایی مویینگی، بعدها در حالت خلوص به دست آمد و آقای لاووله<sup>۱۰</sup> در فرانسه فرمول شیمیایی آن را به دست داد که اپی‌کاتشین épicatechine است؛ ترکیبی بدون نیتروژن و کاملاً متمایز از ویتامین PP. آن را هم با سنتز تهیه کردند.

ردیف ویتامینهای B اخیراً بسیار طویل شده است. ویتامین B<sub>۶</sub> را معمولاً اسید فولیک می‌نامید

1. Sure    2. Karrer    3. Szenta Györgyi    4. Reichstein    5. Collison    6. Andersag
7. Warburg    8. R. Kuhn    9. Elvehjen    10. Lavollay

زیرا آن را در سال ۱۹۴۷ اساساً از برگ‌های سبز به‌دست می‌آوردند، اما از جگر و از مخمر آب‌جو هم تهیه می‌شود. سنتز آن هم عملی شده است و در درمان کم‌خونی تأثیر دارد. در سال بعد، ویتامین B<sub>۱۲</sub> به‌مقدار بسیار کم، با عمل آوردن مقدار زیادی جگر حیوانات به توسط گروه اسمیت در انگلستان و گروه ریکه<sup>۱</sup> در ممالک متحده آمریکا به‌دست آمد. در این‌جا، خود را در برابر ترکیب کمپلکسی از کبالت یافتند که علیه کم‌خونی مزمن، که تا آن زمان یک بیماری کشنده بود، تأثیر داشت. تهیه صنعتی آن به‌عنوان فرآورده جانبی استرپتومایسین بود، زیرا که از بعضی باکتریها به‌دست می‌آید. شمار زیاد دیگری از عوامل ویتامینی، معرفی شدند، که خالص و نیز از راه سنتز به‌دست آمدند، مثلاً ویتامینهای K یا ویتامینهای H و F و ... از حدود سالهای ۳۰ زیست‌شیمی صنعتی در قسمت تولید و فروش فرآورده‌های ویتامینی پیشرفت زیادی داشت. بیشترین تعداد آنها از راه شیمیایی تهیه می‌شوند که جانشین همه یا بخشی از ویتامینهای دارای منشأ مواد خام طبیعی، گیاهی یا جانوری شدند. اما روشهای شیمیایی - زیستی نیز کنار گذاشته نشده‌اند. ویتامین D، یا به عبارت درست‌تر، ویتامینهای D، هنوز از روغن جگر ماهی، یا با در زیر اشعه قرار دادن پیش ویتامین آن به‌دست می‌آید. شیر را نیز برای اینکه مقدار ویتامین D آن زیاد شود تحت تأثیر اشعه می‌دهند. بدین ترتیب، بر اثر تحقیقاتی که صرفاً هدف پزشکی داشته‌اند و دانشمندان فیزیولوژی آن را دنبال کرده و شیمیدانها آن را توسعه داده‌اند، فعالیت صنعتی بزرگی ایجاد شد که هم‌چنان روی به‌پیش و گوناگونی دارد.

شناخت هورمونها: درباره یکی از آخرین رشته‌هایی که در صنعت زیست‌شیمی پدید آمد، هورمونها، همین سخنان را می‌توان گفت. نخستین آشنایی با این مواد در اواخر سده گذشته بود، زمانی که فیزیولوژی به تازگی آشکار ساخته بود که بعضی از غده‌های درون‌ریز، یا حتی بخشهایی از این غده‌ها، تعدادی عوامل شیمیایی با مقادیر بسیار کم در ارگانیزم ترشح می‌کنند که روی وظایف حیاتی تأثیر ویژه‌ای دارند. اصطلاح رایج برای باز نمودن پدیده اثر هورمونها، همانا پیام‌آوران شیمیایی است. عامل ترشح شده، از یک غده یا بخش کاملاً مشخصی از آن، در خون ریخته می‌شود و از فاصله‌ای اجرای وظایف اعضای دیگر یا غده‌ها را در شرایط مشخصی که مناسب کار آنهاست، تنظیم می‌کند.

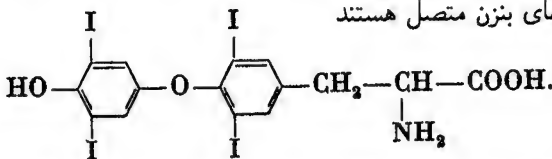
در بعضی از درمانهای پزشکی تجربی از مدتها پیش، وجود این عوامل مورد قبول قرار گرفته بودند. تحقیقات در این باره، از سال ۱۸۹۰ با بررسی ترشح هیپوفیز یا روابط بین کم‌کاری بعضی از غده‌ها، مانند تیروئید یا لوزالمعده و بعضی بیماریها آغاز شد. در کمتر از پانزده سال، نخستین

هورمون را با روش شیمیایی تولید کردند.

دو پژوهشگر با نامهای آلد ریچ<sup>۱</sup> از یکسوی و تاکامینه<sup>۲</sup> از سوی دیگر، آدرنالین ترشح شده از بخشهای نرم غده‌های فوق‌کلیوی را خالص به‌دست آوردند؛ اثر آن روی کار اعضا، چندین نوع بود: انقباض رگهای مو بین خون، تنظیم مقدار قند خون و متابولیسم بازال<sup>۳</sup>. آقای ف. اشتولسه در سال ۱۹۰۴ در آزمایشگاههای Farbwerke Hoechst، کارخانه رنگ‌سازی و فراورده‌های شیمیایی، فرمول شیمیایی آن را یافت که نسبتاً ساده بود و روش ساخت سنتزی آن را بر پایه فراورده‌های بسیار رایج دی‌کلروبنزن (اورتو)، که دی‌فنول مربوطه را تهیه می‌کند، متیل‌آمین و یک مشتق کلردار اسید استیک، کلرور کلراستیل، که طی چند مرحله از استیلن به‌دست می‌آید، معلوم کرد.

دو هورمون دیگر غده‌ای مشخص شدند و در طی پانزده سال، به‌طور خالص به‌دست آمدند. اما ساخت صنعتی آنها بسیار دشوار بود.

اولی را آقای کندال با کارهای مدید از ۱۹۱۳ تا ۱۹۱۹ از تیروئید (غده درقی) استخراج کرد، و در پایان این مدت، در شکل یک فراورده متبلور بسیار فعال آن را به‌دست آورد. این، همان تیروکسین است که آقایان هارینگتون و بارجر<sup>۴</sup> فرمول آن را باید تعیین کرده و نشان داده باشند که این ترکیب، ۶۳٪ ید دارد که به حلقه‌های بنزن متصل هستند



همین نویسندگان به سنتز این اجسام نیز توفیق یافتند. در نتیجه می‌بایست پذیرفت که چندین هورمون تیروئید وجود دارد که جملگی از راه سنتز ساخته می‌شوند. در پزشکی، عوامل تازه تنظیم‌کننده متابولیسم بازال در دسترس قرار گرفته بودند.

هورمونی که به توسط گروهی از سلولهای لوزالمعده، جزایر لانگرهانس، ترشح می‌شود کار دانشمندان فیزیولوژی و پس از آنها، شیمیدانها را دشوارتر کرد. در سال ۱۸۸۹، یعنی در آغاز پژوهشهای پزشکی در این زمینه، آقایان فون مهرینگ<sup>۵</sup> و مینکوفسکی متوجه تأثیر فراورده ترشح این سلولها در متابولیسم قند - که بی‌نظمی آن ایجاد دیابت قندی می‌کند - شدند. اما استخراج عامل فعال در این مورد، تا مدتها امکان‌ناپذیر می‌نمود. آقای فردریک گ. بنتینگ<sup>۶</sup>، پزشک کانادایی، که

1. Aldrich 2. Takamine

۳. مجموع فعالیتهای فراساختی (آنابولیکی) و فروساختی (کاتابولیکی) یک موجود زنده در حالت استراحت، برای تأمین انرژی لازم جهت اعمال حیاتی. - م

4. Barger 5. von Mehring 6. F.G. Banting

آقای بست<sup>۱</sup> دانشمند فیزیولوژی، در بخشی از کارها یار او بود سالهای ۱۹۲۰ - ۱۹۲۱ را وقف این تحقیق کرد و در آغاز ۱۹۲۲ نخستین موفقیتها را به دست آورد.

کارایی انسولین به عنوان داروی دیابتها از نو انگیزه پژوهشهایی، از یکسو برای روبه راه کردن روشی جهت استخراج زیاد، و از سوی دیگر برای تعیین ترکیب آن و کوشش در انجام سنتز آن شد. ساخت خالص و متبلور آن به کمک غده های حیوانات، پس از پژوهشهای فراوان گروههای متعدد پژوهشگر و آزمایشگاههای صنعتی امریکای شمالی در طول جنگ جهانی دوم عملی شد.

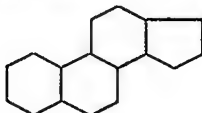
شیمیدانها بزودی دانستند که در برابر یک ترکیب پروتئیدی بسیار پیچیده قرار دارند. پس از اینکه آن را به مقادیر فراوان و در حالت متبلور و دارای خلوص زیاد تهیه کردند، ترکیب شیمیایی آن هم تدریجاً روشن شد. در شروع سالهای ۵۰ آقای زنگر فرمول کامل انسولین را که وزن مولکولی آن حدود ۶۰۰۰ است تعیین کرد. این مولکول غول پیکر، دو زنجیر پپتیدی دارد که با پلهای گوگردی به یکدیگر متصل هستند، هریک کمتر از شانزده گروه نسبتاً ساده، از آن جمله اسید گلوتامیک، سیستمین، تیرازین، والین، لوسین و غیره ندارند. کمپلکس بودن مولکول، سنتز آن را بسیار دشوار می کند. باید گفت که انسولین و نیز هورمونهای متعدد هیپوفیز، از جمله فراورده های زیست شیمیایی استخراجی از مواد طبیعی به شمار می آیند.

هورمونهای جنسی: رشته غدد درونریز که در آغاز سده بیستم شروع خوبی داشت، در سالهای ۱۹۳۰ با کشف هورمونهای جنسی و سپس غده کوچک هیپوفیز یا نخاعی در زیر مغز، که نه تنها بر ترشحات هورمونهای جنسی، بلکه روی شماری از ترشحات دیگر نیز فرمان می راند، سراپا دگرگون شد. بررسی کارهای تولید مثل، طی سالهای ۱۹۲۰ به کشف این موضوع انجامید که تعدادی بافتهای بیضه و تخمدان رفتاری همچون غده های درونریز دارند و هورمونهایی با تأثیر فیزیولوژیکی خاص ترشح می کنند. کمی بعد توجه یافتند. که چنین خصوصیتی آنچنان هم که در آغاز گمان می رفت محدود نیست.

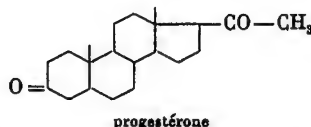
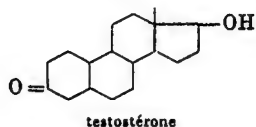
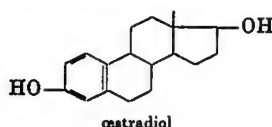
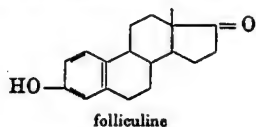
آقای ادوارد ادلبرت دویزی<sup>۲</sup> در امریکا و آقای آدولف بوتنانت<sup>۳</sup> در آلمان توانستند نخستین هورمونهای جنسی - بویژه فولیکولین یا استرون oestrone میزۀ زنهای آبستن - را در سال ۱۹۲۹، متبلور و خالص به دست آورند. ساخت صنعتی آنها از میزۀ مادیانهایی که برای این کار، آنها را آبستن می کنند و توسط مؤسسات بزرگ فراورده های زیست شیمیایی نگهداری می شوند بزودی آغاز شد. یکی دو سال بعد آقایان وینت هاوژن و هاینریش ویلانت<sup>۴</sup>، شیمیدانهای آلمان نشان دادند که فرمول اساسی همه هورمونهای جنسی، مشابه استروئیدهایی است که در آن زمان در کلسترول



زنگ چاودار و در ویتامین D با آن برخورد کرده بودند. ساختار پایه این خانواده، سه حلقه با شش اتم کربن و یک حلقه پنج اتمی دارد.

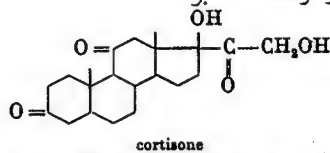
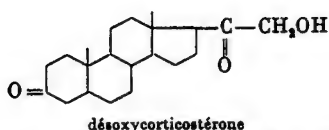


بین آنها می‌تواند پیوندهای دوگانه وجود داشته باشد و روی آنها ممکن است تعداد  $\text{OH}$ ،  $\text{O}$  یا  $\text{CH}_3$  مستقر شده باشند. وانگهی یک زنجیر خطی گاهی روی یکی از کربنهای حلقه آخر پدید می‌آید. تبدیل یک هورمون به دیگری تنها با تغییرات جزئی عناصر افزایشی در ساختار پایه، امکانپذیر است:



در طی سالهای ۴۰، سنتز بیشتر این استروئیدها عملی و ساخت شیمیایی آنها در امریکا که بیست سال بعد سال در هر سال یک تن فولیکولین تولید می‌کرد شروع شد.

همین نوع ترکیب در اجسامی که از کپسولهای فوق‌کلوی به دست می‌آمد. یافت شد. همین تحقیقات همزمان بوسیله رایششتاین در سویس و نیز توسط ونیترشتاین<sup>۱</sup> و کندال در امریکا انجام می‌گرفت. این دانشمندان زیست‌شیمی، ۲۸ استروئید را جدا کردند که شش‌تای آنها فعالیت فیزیولوژیکی داشتند. در سال ۱۹۳۸ فرمول دزوکسی‌کورتیکوسترون توسط آقای رایششتاین معلوم شد و پس از آن همه دانشمندان بزرگ شیمی آلی آن زمان در توضیح فرمولهای ترکیبات دیگر و مشتقاتی از آنها که فعالیت فیزیولوژیکی دارند، شرکت کردند. نخستین ساخت سنتزی آنها، بخشی در آغاز سالهای ۱۹۴۰ بود که به تولید شیمیایی رده تازه‌ای از داروها انجامید و تولید آنها در ممالک متحده امریکا در هر سال سریعاً به چندین تن در سال رسید، در حالیکه همه امکانات هنوز به‌کار گرفته نشده بود:



سنتز این هورمون‌ها همیشه از راه شیمیایی نبوده است. هورمون پروژسترون بوسیله اجسام زرد

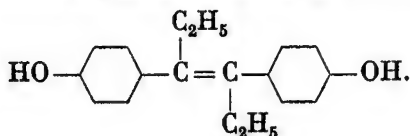
تخمدان، پس از عادت ماهانه زنان، از کلسترول یا از فیتوسترول در مقیاس صنعتی به دست آمد. این هورمون افزون بر کاربرد درمانی، برای تولید ترکیب واسطه‌ای جهت ساخت کورتیزون به کار می‌رود. راههای گوناگونی برای تولید کورتیزون شناخته شده‌اند که در آنها تثبیت گروه OH روی یک محل مورد نظر مولکول استروئید، با عمل میکروبیولوژی انجام می‌گیرد. دنباله این تولید شامل تعدادی واکنشهای شیمیایی است که برای کامل شدن، مستلزم گذر از مراحل متعدد دقیقی است.

هورمونهای هیپوفیز: به طوری که ذکر شد، کشف هورمونهای جنسی مقدمه‌ای برای کشف هورمونهای هیپوفیز شد. این غده که در قاعده مغز قرار دارد، بسیار کوچک است و دارای دو منطقه ترشح هورمونی است. ترشحات لب جلویی می‌تواند شامل ۲۴ هورمون مختلف باشد که ده‌تای آنها جدا و شناخته شده‌اند و هورمونهای تحریک، بر ترشح هورمونهای جنسی فرمان می‌دهند. جملگی، پولی‌پپتیدهایی هستند چنان کمپلکس، که شیمیدانها، نتوانسته‌اند آنها را سنتز کنند. برای ساخت آنها از هیپوفیز خوک استفاده می‌کنند و مستلزم عملهای زیست‌شیمیایی بسیار دقیقی است.

از قسمت پشتی هیپوفیز سه هورمون به دست آمده است، اکسیتوسین oxytocine که انقباض عضلات رحم را در زایمان کنترل می‌کند؛ وازوپرسین vasopressine که فشار خون را تنظیم می‌کند؛ آدیوریتین adiurétine که داروی دیابت بی‌مزه است. جدا کردن این سه هورمون را گروه اکام<sup>۱</sup> شیمیدان امریکایی در ۱۹۲۸ انجام داد و در سال ۱۹۵۴ آقای دو وینیو<sup>۲</sup>، باز در امریکا، فرمولی و روشی برای سنتز این هورمونها پیشنهاد کرد و ساخت شیمیایی آن بیدرنگ شروع شد. پژوهشهای دو وینیو سبب شد که از همان زمان پیش‌بینی کنند که وظیفه هیپوفیز به عنوان تنظیم‌کننده هورمونی ارگانسیم، خود به فرمان ترشحات مناطقی از مغز است که هیپوتالاموس نام دارد و گروهی از رگهای میکروسکوپی آنها را به یکدیگر وصل می‌کنند. هورمونهای وازوپرسین و اکسیتوسین که توسط دو وینیو کشف شدند نیز خود از عوامل هیپوتالاموس هستند که از قسمت پشتی هیپوفیز، پخش می‌شوند. عامل سوم، کوهرین coherine نیز در سال ۱۹۷۳ جداسازی شد. در مورد قسمت جلویی باید گفت که ترشح‌کننده هورمونهایی است که بر رشد، ترشح غدد فوق‌کلیوی (کورتیکواسترون)، تیروئید (تیروکسین) و گونادوتروپها gonadotropes (تستوسترون، پروژسترون، استروژنها) فرمان می‌رانند. اما خود آن نیز از هورمونهای ترشح شده از هیپوتالاموس فرمان می‌گیرد. در طی سالهای ۶۰ دو گروه دست به کار استخراج آنها در مقیاس نیمه صنعتی از میلیونها مغز حیوانات برای تهیه حدود یک میلیونمیلigram از یکی از این هورمونهای با نشانه TRF

شدند. پس از اینکه ساختار TRF به‌طور تقریبی مشخص شد، هر دو گروه: گروه دکتراوولمین<sup>۱</sup> و گروه دکتراشالی<sup>۲</sup> توانستند با تقریبهای پیاپی در سال ۱۹۷۰ راه سنتز آن را بیابند، و در ۱۹۷۲ سنتز یکی دیگر از این هورمونهای مغزی، LRF را به‌دست دهند. این نمونه نشان می‌دهد که با وجود اهمیت نتایج به‌دست آمده، زیست‌شناسی و شیمی گویا هنوز باید فراورده‌های متعدد واجد فعالیت‌های اساسی دیگری را کشف و تولید صنعتی آنها را نیز تأمین کنند.

بدین ترتیب، قلمرو صنعت دارو - شیمی، پس از حدود چهل سال، در سایه وسایلی که شیمی وارد بیولوژی و فیزیولوژی کرده بود گام به مرحله تحولی گذاشت. نه تنها خانواده‌های بزرگ ترکیبات فعال، مورد استفاده باقی ماندند، بلکه پژوهش شیمیایی، این واقعیت را روشن ساخت که اجسامی با فرمولهای بسیار متفاوت از بعضی عوامل شناخته شده، فعالیتی مشابه و برابر با آنها دارند. به‌عنوان نمونه از هورمونهای استروژن مصنوعی نام می‌بریم که نخستین آنها دی‌اتیل استیوسترول است و به توسط آقای دودز در سالهای ۱۹۳۷ - ۱۹۳۸ ساخته شد و مانند مشتق هیدروژندار خود، خصوصیتی هم‌ارز استرادیول دارد



ترکیبات دیگری که پژوهش‌گران متعددی آنها را مطرح ساختند در دنباله گسترش فهرست فراورده‌های شیمیایی موجود در درمان وارد شده‌اند.

گرچه کمیت تولید این شاخه ویژه از شیمی صنعتی برای هیچ‌یک از فراورده‌های متعدد بازرگانی خود رقم چشمگیری نیست، این واقعیت که آنها جز به مقادیر بسیار اندک به‌کار نمی‌روند، اعتبار اقتصادی قابل توجهی به آنها می‌بخشد. ضمناً تأثیر آنها بر کارایی درمان پزشکی در سراسر جهان نیز باید به حساب آورده شود.

## مواد سنتزی

تا اینجا دیدیم که تحول صنعت شیمی در طی «سده نخست بیستم» با پیدایش روشهای سنتز در صنعت نیتروژن و اسید سولفوریک، تهیه فراورده‌های مصنوعی، معمولاً از مواد طبیعی و تقسیم‌بندی ساخت‌های مواد آلی، که غالباً تا سنتز صنعتی برای مواد پاکسازی، ضدانگل و ترکیبات دارویی زیستی به پیش می‌روند، مشخص می‌شود.

اما، موازی با این خطوط بزرگ تحول، در طول همین دهه‌ها، تحول دیگری هم روی داد که

چهره شیمی صنعتی و نیز ساختار آن را، از آنچه که در سالهای ۳۰ بودند، کاملاً تغییر داد. گرچه در کوشش برای دریافت روند کلی این تحول، باید خطوط گوناگونی را که غالباً انگیزه کنجکاوی داشته‌اند از انواع پژوهشها یا نیازهای اقتصادی و اجتماعی مشخص، تفکیک کرد، این هم درست است که جملگی در سراسر تاریخ خود با یکدیگر بستگی داشته‌اند و هیچ‌یک جانشین دیگری نشده‌است. گسترش سریع مواد پلاستیکی و الیاف مصنوعی مثلاً جانشین مشتقات سلولوزی، فنوپلاستها و آمینوپلاستها نشدند. باین حال، این مرحله واپسین تحول صنعت شیمی، بدین دلیل آغاز شد که مراحل دیگر سپری شده بودند.

وانگهی کنجکاوی پژوهندگان متوجه ساختار ترکیبات طبیعی مانند سلولوز یا کاتوچو شده بود و از سوی دیگر، واکنشهای هیدروژندهی به مواد دیگری غیر از نیتروژن، گسترش یافته بود، و بالاخره دشواریهای بسپارشی، به‌طور علمی برطرف شدند، زیرا بر علت‌های تشکیل آنها به‌طور کاملاً سنجیده‌ای آگاهی یافته بودند.

نخستین آگاهیها از درشت‌مولکولها: از همان اواسط سده نوزدهم، شیمیدانها از ترکیب خام مواد طبیعی که صنعت دست به استخراج و تبدیل آنها به مواد دیگر زده بود - که سلولوز و کاتوچو، از جنبه صنعتی، مهمترین آنها بودند - آگاهیهای دقیقی به‌دست آورده بودند. حدود سه‌چهارم یک سده، کار روی این مواد بی‌وقفه ادامه یافت. از دوران نخست، تا آغاز سده بیستم، تنها روشهای شیمیایی، فعال بودند و امکان موفقیت با این روشها روزافزون بود، بدون اینکه امیدی به پایان کار به‌وجود آید. گرچه بزودی این آگاهی به‌دست آمد که این مواد از زنجیرهای طویل مولکولی، با تکرار منظم یک الگو تشکیل شده‌اند، اطلاع بر روابط موجود میان ساختار شیمیایی و سازمان فیزیکی هریک از آنها محال می‌نمود. مسأله آرایش مولکولی را نمی‌توانستند از راههای ساده شیمیایی حل کنند. این ترکیبات عظیم را به‌عنوان مواد بی‌شکل می‌نگریستند و این حالت، اجازه هیچ تفسیر فیزیکی - شیمیایی خواص آنها، نظیر: افزایش طول، کشایی، مقاومت در برابر پارگی، استعداد ریسیدگی و غیره را نمی‌داد.

نخستین مواد پلاستیکی و الیاف مصنوعی، مشتقات سلولوز، باکلیت، و بعداً متیل کاتوچوی هوفمان، در دورانی ساخته شدند که آگاهیهای کافی به‌دست آمده بودند. خوشنودی از تولید مصنوعی ردیف مفصلتری از مواد طبیعی، دلمردگی ناشی از بی‌اطلاعی از ساختار همه آنها را جبران می‌کرد. کم اطلاعی نسبت به این صنعت جدید، که هنوز در مرحله آزمایش بود، نه تنها رشد آن را نساخت بلکه نوآوران را بیشتر به کشف خواص اورگانو فیزیکی فراورده‌های جدید، برای

استفاده‌های فنی و اقتصادی از آنها برمی‌انگیخت، تا اینکه این فراورده‌ها مشخصات دلخواه را به‌دست آورند. شکست کاتوجوی مصنوعی اولیه، که در جنگ جهانی اول در آلمان ساخته شد، بخوبی ثابت کرد که عدم آگاهی از ساختار مواد طبیعی درشت‌مولکول، چه موانعی ایجاد می‌کند. درباره کاتوجو باید گفت که همان‌طور که ذکر شد (صفحه ۶۷۲) که ایزوپرن، ترکیب آلی پایه

آن، سرعت شناخته شد. آقای بوشاردا در سال ۱۸۷۹ متوجه شد که این کرپور دو اتیلنی

$$\text{CH}_2\text{OH}-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{CO}_2\text{H}$$

اگر همراه با اسید کلریدریک غلیظ گرم شود بسیار می‌گردد، و یک

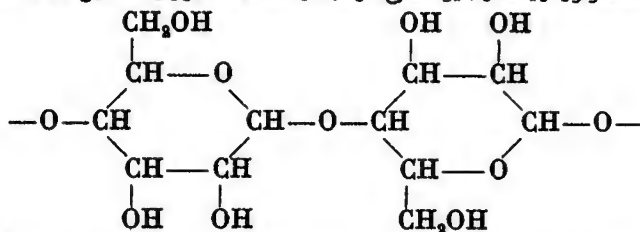
جرم لاستیکی شبیه کاتوجوی طبیعی به‌دست می‌آید. از این مشاهدات اولیه، ردیفی از روشها در آلمان و انگلستان برای تثبیت بهترین شرایط سپارش کرپورهای دواتیلنی پدید آمد. فرانسوا هوفمان و همکارانش، راهی برای تهیه دی‌متیل بوتادی‌ان یافتند که در اقتصاد زمان جنگ می‌شد آن را نسبتاً اقتصادی نامید.

روش وی برپایه هیدروژن‌دهی به استون بود. مؤسسه رنگ‌سازی بایر در سال ۱۹۱۲ اختراعی را به ثبت رسانید که شامل روشی بود که در سالهای ۱۹۱۴ - ۱۹۱۸ در آلمان برای بریدن از منابع رزینهای طبیعی به‌کار گرفته می‌شد. به مجرد پایان مخاصمات، ساخت این نوع کاتوجو، به‌علت هزینه بالای تولید و کیفیت پایین آن، کنار گذاشته شد.

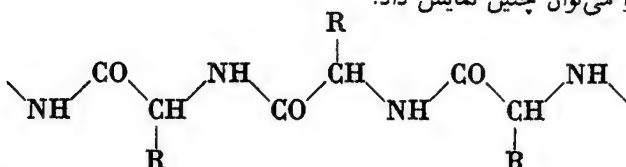
ترکیب شیمیایی دو خانواده بزرگ دیگر مواد طبیعی، هولوسیدها holosides و پروتئیدها و نیز آگاهیهای نخستین درباره ساختار مولکولی آنها، در اثر همگرایی کارهای متعدد در همان دهه‌ها به‌دست آمدند. از جمله شیمیدانهایی که در پایان این دوره بسیار درخشید آقای امیل فیشر آلمانی است که در سالهای ۱۸۸۴ و ۱۹۰۰ ماهیت مولکولی هولوسیدها و پلی‌هولوسیدها (سلولوز، آمیدون) و نیز بعداً در ۱۹۰۰ تا ۱۹۰۶ پروتئیدها را توضیح داد.

درباره ردیف نخست باید گفت که آقای فیشر ثابت کرد که مولکول پایه آن، گلوکوز است و فرمولی با شش کربن راست‌خط برای آن پیشنهاد کرد. در همان زمان آقای والتر نورمن هاورث<sup>۱</sup> و همکارانش در بررسی گلوکوز و فراورده‌های سپارش آن (فراورده‌های ناشی از تجزیه سلولوز بوسیله هیدرولیز، مانند سلوبیوز cellobiose) یک فرمول ناجور حلقه (هتروسیکلیک) پیشنهاد کردند. آنان

بدین ترتیب معتقد شدند که سلولوز از یک زنجیر خطی مرکب از حلقه‌های فراوان تشکیل شده است:



در باره پروتئیدها، باید متذکر شد که تجزیه کنترل شده زنجیرهای درشت مولکول سازنده آن و جداسازی ظریف مولکولهای ساده‌تری که بدین ترتیب به دست می‌آیند، نشان می‌دهند که عناصر اصلی آنها آمینو اسیدهای نسبتاً معدودی هستند و به شکل آمیدهایی با یکدیگر اتصال دارند. نمای کلی زنجیرهای پروتئیدی را می‌توان چنین نمایش داد.



مثلاً ترکیب شیمیایی ابریشم رفته‌رفته پیش‌بینی شد. تار ابریشم، یک لایه خارجی از سرین، آمینو

اسید الکل:  $\text{CH}_2\text{OH}-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{CO}_2\text{H}$  دارد و یک تار داخلی، فیبروئین، که آنالیز آن نشان

می‌دهد که از حدود ده آمینو اسید ساخته شده است که فراوانترین آنها عبارتند از: گلیکوکول ۴۰/۵٪ که ساده‌ترین آمینو اسیدهاست و آلانین ۲۵٪ که هم‌رده و بلافاصله بالاتر از گلیکوکول قرار می‌گیرد. شیمی درشت مولکولها: کارشناسایی بزرگ مولکول اجزای این مواد طبیعی به مدت چندین دهه ادامه داشت و در همان حال نتایج صرفاً شیمیایی، بدون سستی و اهمال مورد بررسی قرار می‌گرفتند و تکمیل می‌شدند. ساختار دارای زنجیرهای طولانی مولکولی کائوچو که در سال ۱۹۰۰ آقای وبر آن را حدس زده بود پس از گذشت بیش از بیست سال، آن هم پس از کارهای شمار زیادی از شیمی‌دانها، و در پیشاپیش آنان آقای هرمان شتاودینگر تأیید و معلوم شد که همه مواد پلاستیکی، بویژه پلاستیکهای مصنوعی که در آن زمان به کار می‌رفتند از زنجیرهای راست و طولی ساخته شده‌اند که تحت تأثیر هر نوع دستکاری، به شکل شبکه‌های سه بعدی به یکدیگر متصل می‌شوند. در همین دهه‌های ۲۰ و ۳۰ بود که شاخه تازه‌ای از دانش شیمی، شیمی درشت مولکولها، به وجود آمد اما تا زمانی که روشهای فیزیکی برای کمک بروشهای شیمیایی کلاسیکی شیمی آلی روی نیاورده بود نمی‌توانست شکل بگیرد. روشهایی که نخست به یاری خوانده شدند مربوط به

بررسی محلولهای کلوتیدی بودند که قوانین بنیادی آنها در آزمایشگاهها به دست آمده بودند و به بررسی حالات ماده می پرداختند. یک جریان تحقیق علمی در آغاز سده نوزدهم پدید آمد و با حل پیوسته مسایل پیش آمده، لاینقطع به پیش می رفت.

فیزیکوشیمی کلوتیدها: بدین ترتیب شیمی درشت مولکولها توانست مجموعه‌ای از روشها در اختیار داشته باشد که با آنها بتواند نه تنها حدود بزرگی مولکولها بلکه مقدار بسیار نزدیک - اگر نه دقیق - ابعاد مولکولهای غول پیکر را، که مدتها در پی آن بودند، به دست دهد. قوانین انجمادسنجی (کریوسکوپی) و تونومتري<sup>۱</sup> که اطلاعات دقیقی برای مولکولهای کوچک می دهند، برای درشت مولکولها، مقداری که به دست می دهند بسیار تقریبی است. اما، برعکس، پدیده‌هایی که به محلولهای بلورنا و نیز کلوتیدها مربوط می شوند اندازه گیریهای رضایتبخش تری دارند. همین وضع برای اندازه گیری فشار اوسمزی، نفوذ نور تکفام، رسوب شتابنده بوسیله مرکز گریز کردن و سپس مرکز گریز کردن سریع<sup>۲</sup> که با روشهای نوری قابل مشاهده است، وجود دارد. این فرایندها به تقریب یک دست یافتند، و در اواخر سالهای ۳۰ استقرار فرضیه‌های دارای جنبه عمومی را ممکن ساختند. مثلاً دستگاه مرکز گریز سریع سودبرگ<sup>۳</sup> که بوسیله این پژوهنده و همکارانش، برای تحقیق پروتئیدها به کار گرفته شد، اطلاعات به دست دادند که بر پایه آنها درشت مولکولهای پروتئیدها، باید از مولکولهایی با جرم ۱۷۶۰۰ ساخته شده باشند. کنار گذاردن روشهای دیگر، بویژه روشهای شیمیایی، ظاهراً نشانه تأیید این ادعاست که جرم مولکولی شمار زیادی از پروتئینهای شناخته شده، به ضریبی از این واحد نزدیک است: پپسین ۳۷۳۰۰، انسولین ۳۸۰۰۰، ویروس پروتئین موزائیک تنباکو ۱۷ میلیون (حدود ۲۰ میلیون).

همه می دانند که بویژه این ویروس بوسیله استنلی مورد بررسی قرار گرفت و آن را در ۱۹۳۵ به شکل بلور جدا کرد. از جمله بررسیهای دیگری که در این زمان با روشهای گوناگون انجام گرفت نشان دادند که ویروسهای پروتئینی، یک مرحله واسطه‌ای بین جانداران و درشت مولکولها می باشند. بدین ترتیب، مجموعه‌ای از پژوهشها در زمینه‌های بسیار گوناگون و تکنیکهای جدید شیمی آلی برای دست یافتن به آگاهیهایی اساسی و روشهایی برای اندازه گیری و کنترل، کمک کردند. خاصیت دیگری از محلولهای کلوتیدی، ویسکوزیته (لزوجت)، که به نظر پژوهندگان، اندازه گیری آن برای آگاهی بر بزرگی مولکولها به اندازه روشهای پیش گفته شده اطمینان بخش نیست، بیشتر بوسیله تکنسین‌ها به کار گرفته شد. حدود سال ۱۹۲۵ آقای شتاودینگر رابطه جرم مولکولی بسپارهای بالا و ویسکوزیته مخصوص آنها را با کارهای تجربی به دست آورد. ویسکوزیته‌سنجهای پیشنهادی

۱. اندازه گیری وزن مولکولی بر روش پایین آوردن فشار بخار محلول. - م

۲. اولتراسانتریفوگاسیون - بیش از ۶۰۰۰۰ دور در دقیقه. - م.

سازندگان مختلف در آزمایشگاههای صنایع رواج یافتند.

پراش اشعه X: دستاورد دیگر فیزیک، پراش اشعه X، روشهای اطمینان بخشی برای آگاهی بر ساختار بسپارهای طبیعی و مصنوعی بالا، فراهم کرد.

ماهیت موجی اشعه X را در سال ۱۹۱۲ آقای ماکس فون لاون<sup>۱</sup> کشف کرد، و دو همکار جوان وی آقایان و. فریدریش و پ. کینپینگ<sup>۲</sup> با استفاده از یک بلور سولفات مس آن را نمایش دادند. این کشف سبب شد که در فهرست اجسام پرتودهنده الکترومغناطیسی اشعه X بالاتر از فرابنفش جای گیرد، و علاوه بر آن، این اشعه وسیله ای برای بررسی آرایش اتمها در ساختار بلورها، در اختیار فیزیکدانان و بلورشناسان گذاشت. اما باید ده سال می گذشت تا بتوانند با این وسیله زوایا و ابعاد را به کمک پراش اشعه X اندازه بگیرند. آقای ویلیام هنری. برگ<sup>۳</sup> و پسرش لارنس در سال ۱۹۱۴ نشان دادند که انحراف دسته اشعه X می تواند به این اندازه گیرها خدمت کند و نخستین طیفسنج با اشعه X را ساختند. آقایان پ. دبای<sup>۴</sup> و پ. شره<sup>۵</sup> در زوریخ در ۱۹۱۶ و آقای ا. و. هال<sup>۶</sup> در ۱۹۱۷ جدا از یکدیگر با به کار گرفتن اجسام آسیا شده به جای بلورهای بزرگ، این تکنیک را به پیش رانند. جنگ وقفه ای در این تحقیق ایجاد کرد، اما حدود سال ۱۹۲۶ با کاربرد آن در طیفسنجی میدان گسترده ای یافت.

روش دبای و شرربی درنگ به عنوان وسیله ای برای کنترل و آنالیز در صنعت در مورد اجسامی نظیر رنگ ها، فلزها، خوردگیها و غیره به کار گرفته شد. از سوی دیگر، پیشرفتی که این وسیله به بلورشناسی داد آن را در جهت بررسی اجسامی، در ابتدا نظیر گرافیت و الماس، به پیش راند و توانستند ساختار متبلور آنها را بشناسند و آنها را در رده اجسام درشت مولکول به شمار آورند. بر این پایه، به بررسی اجسام نامتبلوری که از مولکولهای درشت آلی ساخته شده اند و بالاخره به بررسی آرایش درشت مولکولهای اجسام طبیعی، مانند کائوچو، سلولوز ابریشم یا اجسام مصنوعی نظیر مواد پلاستیک ساخت سالهای ۳۰ روی آوردند.

پراش اشعه X کاربردی بسیار طولانی و ظریف دارد، زیرا تفسیر کلیشه های آن، مستلزم مقایسه ها و محاسبات فراوان است. با این حال، این کار، خود به صورت تکنیکی بسیار مطمئن ارائه شده است. توزیع چگالی الکترونی در روی کلیشه ها، در واقع با توزیع تعداد اتمهای یک مولکول، همان گونه که آقای رابرتسن<sup>۷</sup> در سال ۱۹۳۳ نشان داد، هماهنگ است. پیکربندی آن، شناخت پیوندهای درونی مولکول یا بین مولکولها را ممکن می سازد، و فواصل هسته های اتمها، فواصل

1. Max von Laue    2. P. Knipping    3. W.H.Bragg    4. P. Debye    5. P. Scherrer  
6. A.W.Hull    7. Robertson



مشخصه گروه‌های معین را نشان می‌دهد، مثلاً  $1/54\text{\AA}$  برای پیوند میان دو کربن راست زنجیر، و  $1/42\text{\AA}$  را میان دو کربن و زنجیر حلقوی، و  $1/32\text{\AA}$  را برای پیوند اتیلنی،  $1/19\text{\AA}$  برای پیوند استیلنی و غیره\*.

در اواخر سالهای ۳۰، مجموعه جالبی از روشهای فیزیکی در دسترس دانشمندان شیمی آلی قرار گرفت که در آن زمان برای اجرای سنتز اجسام تازه‌ای تلاش می‌کردند و نیز همان‌طور که دیدیم، انواع و اقسام واکنشهای شیمیایی بسیار انعطاف‌پذیر در اختیار آنان بود.

نخستین نزدیکی به مواد سنتزی: می‌توان تقریباً سه دوره را در پیدایش صنعت مواد سنتزی تشخیص داد. از آغاز این سده تا پایان جنگ جهانی اول، چند اقدام اولیه و محدود در فضای آزمایشگاهی انجام گرفت.

آقای اوتورم<sup>۱</sup> از سال ۱۹۰۰ بررسی ترکیبات آکریلیک و متاکریلیکی را که از اسیدهای مربوطه  $\text{CH}_2=\text{C}-\text{COOH}$  و  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$  یا از نیتریلها مشتق می‌شوند آغاز کرد. وی شاهد پدیده‌های بسپارشی بود که این ترکیبات ایجاد می‌کنند. اما سی سال پس از این تاریخ، یعنی در دوره دوم بود که صنعتی شدن ساخت این بسپارها، همزمان در انگلستان، ممالک متحده امریکا و آلمان عملی شد.

آقای اسمیت در سال ۱۹۰۱ با استری کردن اسید فتالیک  یا با انیدرید

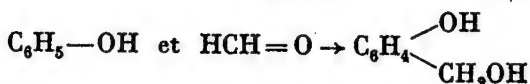
این اسید به کمک گلیسرین، نخستین ترکیب گلیسروفتالات را ساخت. این اسید در آن زمان، فراورده واسطه‌ای ساخت اندیگو بود. بررسی این استری کردن، راه را در سال ۱۹۲۷ برای تهیه روغن خشکانه (سیکاتیف) مصنوعی، و نیز بسپارش آنها، که در ساخت رنگ کاربرد دارد، باز کرد.

بسپارهای کلوتیدهای وینیل  $\text{CH}_2=\text{CHCl}$  و دیگر ترکیبات وینیلی، مثلاً استات وینیل و وینیل بنزن یا استیرویلن (استیرن)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$  موضوع تحقیقات آقای کلاته<sup>۲</sup> در سالهای ۱۹۱۲ - ۱۹۱۴ بود. طی جنگ جهانی اول، همین شخص در آلمان ساخت کلر استات بولی وینیل را که بعدها بنفع استات کنار گذاشته شد، شروع کرد.

این دوره اول با تولید نخستین کائوچوی سنتزی هوفمان، که درباره آن سخن گفته‌ایم، نیز مشخص می‌شود.

\*. یادآوری می‌شود که  $\text{\AA}$  با آنگستروم برابر یک دهم میلیونیم یک میلیمتر است. م.

بسپارشهای صنعتی: دوره دوم اوایل سالهای ۳۰ آغاز می شود، گرچه واقعاً در ادامه کوششهای دانشمندانی از شیمی آلی که برای صنعت کار می کردند گسستگی وجود نداشته است. در واقع در طی این تأخیر آشکار انتقال بود که در سایه پژوهشهای شتاودینگر و گروه وی، نیز تعداد زیادی شیمیدانها و فیزیکدانانی که بویژه در آلمان و امریکا کار می کردند درباره ساختار درشت مولکولها، که قبلاً ذکر آنها رفت، آگاهیهایی تازه ای به دست آمد. سالهای ۳۰ با آغاز تولید صنعتی بسپارهای بزرگ یا هم بسپار (کوپولیم) های سنتزی مشخص می شود. در همین سالهاست که روشهای گوناگون بسپارش قابل استفاده در مقیاس صنعتی کشف شدند. در حقیقت این مشکل روز بود، مشکل انتقال سنتز درشت مولکولها از آزمایشگاه به کارخانه. گرچه به فهم مکانیسمهای شیمیایی بسپارش: پیوند عامل به عامل (مثلاً عامل آمین به عامل اسید، چیزی که آقای والاس هیوم کراتز<sup>۱</sup> بعدها آن را بررسی کرد)، میعان و تراکم همراه با حذف آب از نوع:



که اکنون به طور تجربی، صنعتی شده است، یا بسپارشهایی از راه افزایش روی پیوند اتیلنی، که در آنها شاهراهی به سوی یک کاتالوگ غول پیکر از فراورده های تجارتي باز شد، دست یافته بودند کاربرد این فرایندها در صنعت، مستلزم اصلاح شماری از روشهای کلی بود که هر یک از آنها در ردیفهایی از ترکیبات واسطه ای کاربرد داشتند. تقریباً طی ۲۰ سال میان ۱۹۳۰ - ۱۹۵۰ این تکنیکها بررسی و روبه راه شدند، اما این بدان معنی نیست که این تکنیکها بعدها دستخوش تحول نشده اند. مشکل کار، تعیین محیط و شرایط فیزیکوشیمیایی بود که بسپارشها باید در هر مورد برای رسیدن به بهترین بازده، چه کمی و چه کیفی، واجد آنها باشند. در واقع، با درجه مورد نظر بسپارش، که با این یا آن روش کلی موجود به دست می آمد، روش تولید عبارت خواهد بود از راه امولسیون در واکنشگاه (راکتور) ها و حضور بعضی کاتالیزورها، یا راه محلول کردن تکیار (مونومر) با رسوب دادن بسپار.

بسپارهای وینیلی: با استفاده از فرایند تعلیق در امولسیون بود که بسپارهای وینیلی که بیست سال پیش بوسیله آقای کلاته بررسی شده بودند برای نخستین بار تهیه شدند. مهمترین این بسپارها، ترکیبات آکریلیکی و متاکریلیکی هستند که مؤسسه آقای اوتو ژم و همکارش آقای هاس در آلمان در سال ۱۹۲۷ ترکیبات نخستین و در سال ۱۹۳۵ - ۱۹۳۶ ترکیبات متاکریلیکی را ساختند. ساخت ترکیبات پلی متاکریلات صنعتی در مدت نسبتاً کمی در سال ۱۹۳۱ بود و بر کارهای آقای

چالمرز<sup>۱</sup> کانادایی تکیه داشت. آقای چالمرز کشف کرد که متاکریلات اتیل و نیز نیتریل متاکریلیک می‌توانند متحمل نوعی هم‌بسپارش شوند، و این یک شیشه‌آلی واقعی با خواص نوری جالب توجه است. شیشه‌های متاکریلیکی را مؤسسات بزرگی در آلمان، انگلستان و امریکا حدود سال ۱۹۳۶ در مقیاس صنعتی تولید کردند و با نامهای گوناگونی: لوسیت بوسیلهٔ دوپون دونمور، پلکسی‌گلاس بوسیلهٔ شعبات امریکایی ژم و هاس به فروش می‌روند. همین نام اخیر است که در فرانسه، آلمان و ایتالیا بسیار شهرت دارد.

مشتقات دیگر آکریلی در همان زمانها یا کمی بعد مورد استفاده قرار گرفتند. مثلاً آکریلونیتریل بتدریج از سال ۱۹۴۱ موضوع پژوهش آقای هیل چارچ<sup>۲</sup> از دوپون دونمور برای ساختن الیاف سنتزی بود درحالی‌که شیمیدانهای بایر در آلمان در سال ۱۹۴۲ به همین پژوهش دست زدند. امریکاییها که تقدیر با آنان همراه بود در سال ۱۹۴۸ اورلون را به بازار فرستادند، و در آلون ساخت آلمان شش سال بعد ساخته شد.

در دورهٔ پیش از جنگ، ساخت پولی‌وینیلها در کشورهای نوآور در شیمی صنعتی سنتزی سرعت به‌پیش رفت. چون ردیف ترکیبات وینیلی بسیار طولانی است بنابراین، فهرست فراورده‌های بسپارش یا هم‌بسپارش آنها نیز مفصل است. در سال ۱۹۳۱ کلرور پولی‌وینیل سبب شد که یک فراوردهٔ پرکتری محلول در استون ساخته شود و در آلمان به‌شکل نخ رسیده برای صنعت و با نام  $\text{PeCe}$  به بازار آید. این کلرید پولی‌وینیل که بعدها به پی‌وی‌سی PVC شهرت یافت، ساخت این نوع مواد را توسعه داد - موادی که با افزایش روشهای عمل آوردن آنها، استفاده از مواد نرم‌کننده و تحویل آنها در شکل ورق، مفتول، خمیر و غیره، کاربردهای بسیار گوناگونی یافتند. در فرانسه یک نوع الیاف کم‌کلر را آقای ژ. کوربیر<sup>۳</sup> در سالهای ۴۰ برای رودی‌آستا Rhodiacéta روبه‌راه کرد که در سال ۱۹۵۰ با نام rhovyl وارد بازار شد.

هم‌بسپارش مشتقات وینیل با یکدیگر، چشم‌انداز تنوع فراورده‌ها را باز هم گسترده‌تر کرد. باید ساخت مشتقات فلوئوری، مانند تترافلوئور اتیلن را که تنها دارای کربن و فلوئور است و امکانات هم‌بسپار شدن آن را شرکت دوپون دونمور در سال ۱۹۴۱ پیش‌بینی کرده بود، نیز در نظر گرفت. چند سال بعد این پارافینهای فلوئوردار که نسبت به عوامل شیمیایی کاملاً غیرحساس می‌باشند نخست با نام تفلون، پس با نامهای دیگر روانهٔ بازار شدند.

کشپارهای سنتزی: مواد واسطه‌ای با پیوندهای اتیلنی، در همین دوره به ساخت کشپار (الاستومر)های سنتزی در همه کشورهای، بویژه در آلمان، ممالک متحدهٔ امریکا و

اتحاد جماهیر شوروی [سابق] رسیدند. این ماده احتمالاً بسیار سریع وارد مرحله ساخت صنعتی شد. آموخته‌های جنگ جهانی اول، عوامل اقتصادی و سیاسی میان دو جنگ، آلمان را برانگیخت که بویژه در سالهای ۳۰ به فرآورده‌های جانشینی توجه کند تا از نیازمندی به ماوراءبحار آزاد شود. روسیه هم در دوره نزدیک به جنگ، همین احساس را داشت و ممالک متحده آمریکا، پس از شروع تجاوز ژاپنی‌ها، به کارهای خود شتاب زیاد دادند.

بررسی‌ها، نخست روی بسپارش کربورهای دی‌انی تمرکز یافت که در زنجیرهای خود، دو پیوند دوگانه داشتند تمرکز یافتند. تکپار پایه‌ای آن بسیار ساده، بوتادی‌ان  $H_2C=CH-CH=CH_2$  است که واکنش بسپارش روی زنجیر آن مدتها مورد بررسی بود. حدود سال ۱۹۲۹ شیمیدانهای I.G. Farben Industrie متوجه شدند که با عملی کردن هم‌بسپارش بوتادی‌ان و استیرن، تشکیل ساختار پرشاخه را، که عمل آوردن آن بسیار دشوار است، دور بزنند. بنابراین، آنان از سال ۱۹۳۷ ساخت یک ردیف بونا S را با نشانهای  $S_1$  و  $S_2$  شروع کردند. این ردیف که همگی در زمان جنگ ساخته شدند به‌طور منظم به انواع دیگری از بونا گسترش یافتند که مزایای فراوان داشتند.

در همین واکنشهای بسپارش است که امریکاییها در سالهای ۱۹۴۲ - ۱۹۴۴ به بازکردن یک ردیف GR-S (Government Rubber-Styrene) تشویق شدند. روسها از سال ۱۹۳۲ در سایه کارهای آقای سرگئی لُبدف بسپارهای بوتادی‌ان را، که مشابه بونا‌های اولیه آلمانیها بودند و با حروف SKA و SKB (کاتوجوی سنتزی Synthetics Kaoutchoucs) مشخص می‌شدند، می‌ساختند و سپس یک هم‌بسپار بوتادی‌ان استیرن SKS را نیز ساختند.

اما راه دیگری هم بیدرنگ باز شد، راهی که با کاربرد کلرور دی‌وینیل  $H_2C=CH-CH=CH_2$  یا کلروپرن به پیش رفت. از سی سال پیش می‌دانستند که بعضی از مشتقات کلردار کربورهای اشباع نشده می‌توانند با بسپارش، جسم کشسانی بدهند که هیچ‌کس تا آن زمان کوششی برای تبدیل آن به کاتوجوی مصنوعی نکرده بود. در واقع مسأله به کلرور دی‌وینیل استیلن مربوط می‌شد که آقای نیولات<sup>۱</sup> آن را از استیلن ساخته بود. شیمیدانهای دیگری، بویژه آرنلدم. کالینز در آزمایشگاههای دوپون دونمور از نو به آن پرداختند. آقای کالینز بر اثر القاهای کرانرز توانست در سال ۱۹۳۱ کلروپرن را تهیه کند و بسپارش آن را به یک کشپار سبب شود. این کشپار با نام نوپرن شناخته شد و چند سال بعد، ساخت صنعتی آن آغاز گشت. این نیز ردیف طویل دیگری را تشکیل داد که شاخه‌های متعددی داشت و فرآورده سوپرن در شوروی و بعدها پر بونان C آلمان به این ردیف تعلق دارند.

به دنبال بسپارش ایزوپرن  $\text{CH}_2 = \underset{\text{CH}_3}{\text{C}} - \text{C} = \text{CH}_2$  هم بسپارش بوتادی‌ان با ترکیبات دیگر وینیلی، از جمله آکریلونیتریل و غیره، تنوع کشپارهای مصنوعی را باز هم بیشتر کرد. واکنش ساده شیمیایی که در هر مورد روی کاغذ نوشته می‌شود، برای ساخت صنعتی آن کافی نبود. می‌بایست مسایل متعدد مربوط به روشهای رایج: نوع و طرز کاربرد مواد امولسیون کننده، ترکیبات اولیه واکنش، اثر کاتالیزورگرها و دمای واکنش (کشف سال ۱۹۴۱ سیستمهای به اصطلاح «ردوکس» اکسایش و کاهش» به پیشرفت سرعت بخشیدند) و طبعاً ساختار و ترکیب تجهیزات کار را حل کرد. اگر به این مسایل، دستکاریهای لازم برای تکمیل فراورده‌ها را متناسب با کاربردهایی که برای آنها در نظر گرفته شده است اضافه کنیم متوجه می‌شویم که این، تکنیک صنعتی بزرگ و جدیدی است که در کمتر از دو دهه به بار نشسته است.

سرانجام باید گفت که این کوششهای خلاقانه، پس از جنگ هم سستی نگرفت، زیرا کشپارهای مصنوعی، مشخصاتی تا آن اندازه گوناگون و رضایتبخش دارند که دیگر نمی‌توان آنها را همچون فراورده‌های ساده جانشین کاوچو دانست؛ موادی هستند که باید کاربرد ویژه آنها در صنایع متعدد، یا تکنیکهای کاربردی آنها را یافت.

پولی‌آمیدها: رده دیگری از بسپارهای سنتزی که در دوره دوم آفرینندگی پدید آمد، پولی‌آمیدها هستند. سرگذشت نسبتاً کوتاهی دارند، زیرا هنوز ده سال از پیدایش آنها نگذشته است. این رده از چند لحاظ نمونه است. اول اینکه، پولی‌آمیدها گرایشی را به طور قاطع ثابت کردند که در این دوره همیشه تأیید شده است، و آن اینکه، پژوهش برای یافتن مواد تازه، دیگر نباید کوششی برای دوباره سازی مواد طبیعی باشد. تصادفاً مسأله مربوط به تهیه نوعی الیاف بافندگی بود که بتواند جانشین ابریشم شود. شیمیدانها به این باور رسیدند که گرچه ترکیب شیمیایی ابریشم، شناخته شده است، اما ساخت مصنوعی این الیاف طبیعی محال می‌نماید.

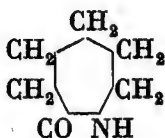
بعداً این رده، کارایی پژوهشی را ثابت می‌کند که بدون اینکه در آغاز، هدف مشخصی داشته باشد انجام گرفته است. آقای والاس هیوم کراتز از سوی دپون دونور، در ۱۹۲۸ با عنوان کارشناسی بسپارهای بالا، خارج از یک برنامه معین کاری، به این پژوهش اقدام کرده بود. سرانجام، «اختراع» نایلون ۶۶ میدانی را در برابر کاربردهای مواد تازه گشود که از مرز الیاف سنتزی صرف، بسیار فراتر رفت.

کارهای نخستین کراتز روی بسپارش استری تمرکز یافت که از اثر اسید سوپریک subérique

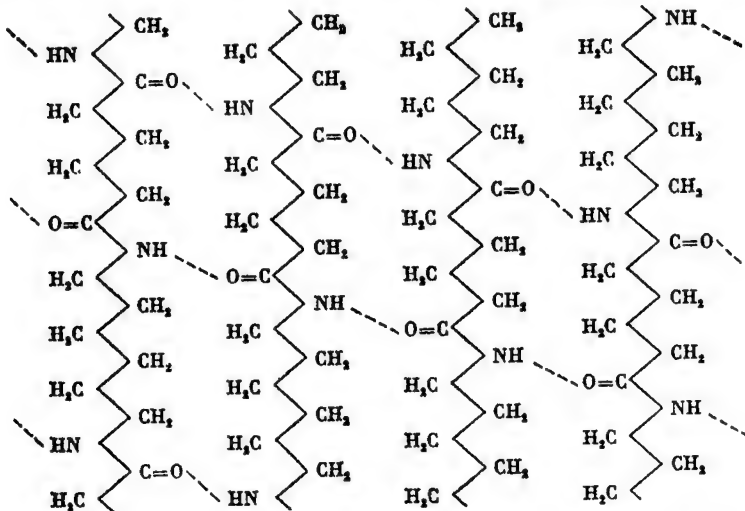
CH<sub>2</sub>OH-CH<sub>2</sub>OH به دست می‌آید. COOH-(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>-COOH acide بر اتیلن گلیکول  
پس از اینکه دو سال در این راه تحقیق کرد، معلوم شد که این راه به نتایج دلخواه نمی‌انجامد. اما آقای ج. و. هیل<sup>۱</sup> دستیار کراتز به وی توجه داد که این فرآورده می‌تواند با گرم شدن، مانند نخ کشیده شود و پس از خنک شدن، این نخها را می‌توان باز کشید تا دارای بهترین کیفیت مکانیکی، استحکام و کشسانی شوند. این مشاهدات، بعدها به ساخت رده تازه‌ای از فرآورده‌های سنتزی منجر شدند. اما در آن زمان کراتز ترغیب شد، که به جای گلیکول از دی‌آمین استفاده، و تحقیق کند که نتایج زنجیری شدن آنها با دی‌اسیدها چه خواهند بود.

دیدیم که در ۱۹۳۱ آقایان کراتز و کالینز روی نئوپرن کار کردند و تنها در سال ۱۹۳۵، پس از بررسی شمار فراوانی از ترکیبات دو دسته اجسام بود که توانستند با تراکم اسید آدیپیک COOH-(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>-COOH و هگزامتیلن دی‌آمین NH<sub>2</sub>-(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>-NH<sub>2</sub>، ماده‌ای تولید کنند که می‌توانست به نخ طولی تبدیل شود و همه خواص ابریشم را داشته باشد.  
در آلمان، در همین سالها، آقایان پاول شلاک<sup>۲</sup> که به حساب ی. گ. فارین ایندوستری کار

می‌کرد ترکیب کاپرولاکتام را که آمیدی حلقوی از اسید آمینوکاپروئیک است



بررسی کرد و راه باز کردن زنجیر و به دست آوردن پولی‌آمید خطی را یافت. امکان بسپارش اسید آمینوکاپروئیک در سال ۱۸۹۹ بوسیله زیگموند گابریل آلمانی و پس از وی در ۱۹۰۷ توسط آقای س. فون براون هموطن وی پیش‌بینی شده بود. اما در آن زمان کسی نمی‌اندیشید که از این راه یک ماده سنتزی نیتروژندار به دست می‌آید و شیمی آن زمان، وسیله این کار را نداشت. خود کراتز از این راه تهیه آگاه بود اما به علت دشواریهای موجود در ساخت اسید مربوطه نیز چون این کار با اشکال باز کردن حلقه کاپرولاکتام، که در جریان گرم کردن ایجاد می‌شد مواجه بود و اتلاف قابل توجه آمینواسید را در پی داشت، از اجرای آن صرف‌نظر کرد. آقای شلاک در کار خود خوشبخت‌تر بود. نخستین اختراعات ثبت شده کراتز که فارین ایندوستری آنها را انتشار داد، با صرف وسایل بزرگی برای افزایش نتایج شیمیدان آن همراه بود و توانست در ۱۹۳۸، پرلون، نخستین نخ پولی‌آمیدی را معرفی کند.



ساختار شبکه‌ای نایلون با پیوندهای میان گروههای CO یک زنجیر و NH زنجیر مجاور، با فاصله ۴/۸ آنگستر، ۱۹۴۸.

شرکت دوپون دونمور بنوبه خود کوشش چشمگیری برای صنعتی کردن روش کراتز به عمل آورد. تعداد ۲۳۰ شیمیدان آن، مدت سه سال در این راه کار کردند. این مؤسسه بزرگ امریکایی در سال ۱۹۳۸ کارخانه‌ای برای تولید آن برپا کرد و در سپتامبر ۱۹۳۹ نخستین جورابها و مسواکهای نایلونی را در روزنامه‌ها تبلیغ کرد. آقای کراتز در سال ۱۹۳۷ مرد. هزینه‌های ساخت این فرآورده به ۲۷ میلیون دلار بالغ شد، اما در یک سال ۶۴ میلیون جفت جوراب فروخته شد.

وقایع جهان به دنبال آن برای امریکاییها مساعد شد درحالی‌که ساخت این فرآورده در آلمان، طی سالهای طولانی متوقف بود. چندین مؤسسه بزرگ اروپا، بویژه تراست انگلیسی ایمپریال کیمیکال اینداستریز (ICI) که برای تولید نخهای نایلونی با شرکت کورتاد لیمیتد<sup>۱</sup> شریک شده بود از دوپون اجازه ساخت گرفت. در فرانسه، شیمیدانی با نام میشل ژنا<sup>۲</sup> که در شرکت پچینی کار می‌کرد و همکاران وی توانستند بر پایه اسید ریسینولئیک یک نوع نخ پولی‌آمیدی بسازند که با تحمل کراکینگ، اسید اوندسیلنی (C<sub>10</sub>H<sub>19</sub>·COOH undecylenique) می‌دهد که می‌تواند به آمینو اسید H<sub>2</sub>N(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>-COOH تبدیل شود. این جسم، همان ریلسان rilsan است که ساخت آن ده سال بعد شروع شد.

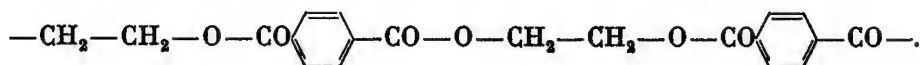
ساختار واقعی نایلون ۶۶ پس از اندک مدتی آشکار شد. نایلون را می‌توان به راههای گوناگون از ارزاترین مواد خام موجود در هر کشور تهیه کرد، بنابراین تهیه آن بسیار با صرفه است. کاربرد نایلون یا مواد دیگر پولی‌آمیدی، عملاً در همه رشته‌های فنی و زندگی جاری است.

گسترش پس از جنگ: سومین دوره تحول صنایع مواد سنتزی، که دوره کنونی است، از سالهای ۵۰ شروع می‌شود. ویژگی این دوره، افزایش برق‌آسای تولید این فراورده‌ها در همه کشورهای صنعتی، پیدایش خانواده‌های تازهٔ بسپارها، و کاربرد مستقیم یک مادهٔ خام اولیه است.

گسترش این تولید، نتیجه تلاش جنگی در تأسیس کارخانه‌های اولیه برای این فراورده‌های جدید بودند. موفقیت نایلون در میان مردم، پیش از آنکه ممالک متحده آمریکا به جنگ کشیده شود تأمین شده بود؛ اما نیازهای تازه بسیار بیشتر از نیازهای مصرفی زمان صلح بود. کاربردها چنان سرعت افزایش یافت که می‌توانستند این سالهای جنگی را بکلی نادیده بگیرند. برای همه این مواد، وضع چنین بود. صلح بازگشته بود و صنعت آمریکا که بسیار مجهز و آماده بود فراورده‌های خود را در همه جهان سرازیر کرد و هاله‌ای از افسانه آن را در میان گرفت. کشورهایی که متحمل بیشترین زیانها شده بودند همگی در فکر نوسازی ظرفیتهای صنعتی خود با رجحان دادن به تولید مواد سنتزی بودند. صنایع دیگر آنها نیز از همین کوششها برخوردار بود و جملگی، مصرفی شده بودند.

پولی‌استرها: پیدایش خانواده‌های تازه‌ای از بسپارهای بالا مربوط به بعد از جنگ نیستند؛ اما چون اوضاع کلی، پشتیبان آنها بود، گسترش تولید آنها، چنانچه جنگ هم پیش نمی‌آمد، بسیار سریعتر انجام می‌گرفت.

پولی‌استرها، یا درست‌تر، دسته‌هایی از پولی‌استرها، در نیمهٔ دوم سالهای ۳۰ بخوبی بررسی شدند. امتیازات به ثبت رسیدهٔ اصلی، در سالهای ۴۴ تا ۵۰ بود و فراورده‌هایی از قبیل تریلن از ICI، در ۱۹۵۵، داکرون از دوپون در ۱۹۵۳ و فیلما یا الیاف دیگر با نامهای بازرگانی گوناگون روانهٔ بازار شدند. آنها به‌طورکلی مشتقات یک دی اسید آلیلی، اسید تری‌فتالیک ترکیب شده با گلیکول هستند. شیمیدانها بدین ترتیب نوعی بسپارش را انجام دادند که بظاهر مثل بسپارش سازنده نایلون بود اما، نه از نوع پولی‌آمید:



فراورده‌هایی که از بسپارش ترفتالاتهای گلیکول به‌دست آمده‌اند خواصی مشابه پولی‌آمیدها دارند.



قابل توجه است که کارهای اولیه پژوهشی در آزمایشگاه یک شرکت کوچک، با هزینه‌های کم انجام گرفته بود: دو شیمیدان انگلیسی با نامهای ج. ر. وینفیلد<sup>۱</sup> و ج. ت. دیکسون با چند دستیار، اما هزینه گسترش و صنعتی کردن آن تنها برای انگلستان به بیست میلیون پوند بالغ شد.

بررسی این نوع تراکم طبعاً شامل همه امکانات کاربردی، پولی‌استرهای آلیفاتیک (خطی) بود که توسط کراتز، بیان و در سال ۱۹۴۲ بوسیله بایر «شبکه‌بندی» شده بودند، اما بویژه حدود سال ۱۹۵۰ با هم‌بسیار کردن آن با مشتقات اسید ایزوسیانیک  $H-N=C=O$  بود که بعدها راه به‌سوی پلی‌اورتانها باز شد. پولی‌استرهای اشباع نشده، که با ترکیبات وینیلی هم‌بسیار شدند، در همان دوران دسته‌های دیگری از رزینها را تهیه کردند.

پولی‌اورتانها: پولی‌اورتانها هم در همان زمان مورد تحقیق بایر قرار گرفتند. آنها در اصل مشتقات

اسید کربامیک  $O=C \begin{matrix} \nearrow NH_2 \\ \searrow OH \end{matrix}$  هستند که اوره، آمید آن است. اما بایر آنها را بروش تراکم استر

ایزوسیانیک  $O=C-N(CH_2)_6-N=C=O$  مشتق از هگزامتیلن دی‌آمین، که آقای کراتز در موارد دیگری آن را به‌کار برده است، با گلیکول به‌دست آورد. در این مورد هم ما در برابر یک خانواده بسیار پرازدحامی قرار داریم که بر پایه آن در سال ۱۹۴۷ کسپارهای سنتزی گوناگونی ساخته شدند.

پولی‌اتیلنها: یکی از خانواده‌های پربارآور کسپارها که در گذر سالهای ۵۰ افزایش یافته است، پولی‌اتیلنها می‌باشند. بررسی امکانات سپارش اتیلن، در سالهای ۲۰ بدلیل اینکه آثاری روی واکنشهای شیمیایی با اعمال فشارهای زیاد داشته است و کاربرد آن در آن زمان با ساخت سنتزی آمونیاک اهمیت بسیار فراوان یافته بود، کار مستقلاً شده بود. ده سال بعد، پس از گذشت مراحل متعدد، پژوهش درباره رفتار اتیلن در فشارهای بالا با رهبری چند شیمیدان ICI (ایمپریال کیمیکال اینداستریز) انگلستان به پیش برده شد. در ۱۹۳۴ این گروه متعدد که زیر نظر آقایان ا. و. فاسیت<sup>۲</sup> و ر. ا. گیسون و م. و. پرن<sup>۳</sup> کار می‌کرد تصادفاً گرد سفیدی به‌دست آورد که بهترین کیفیت مورد انتظار از یک فراورده سنتزی - کشش، قالب‌گیری، پایداری در برابر عوامل شیمیایی و عایق بودن - را داشت. این گرد، بسیار بالایی بود که از اتصال زنجیری مولکولهای اتیلن، که در این تراکم، پیوندهای دوگانه خود را از دست داده بودند:  $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$  ساخته شده بود. دو

سر زنجیر ممکن بود برحسب روشی که برای ساخت به‌کار گرفته شده بود، ساختارهای مختلفی داشته باشند، و بر این اساس می‌توانستند زنجیرهای کوتاه یا بلند شاخه‌دار به‌دست آورند.

هرچند که امتیازات این انگلیسی‌ها در سال ۱۹۳۷ به ثبت رسید، اما ساخت صنعتی آنها پس از پایان جنگ آغاز شد. در اساس، نخستین روشی که به‌کار گرفته شد، تولید نخستین بسیار در فشار ۳۰۰ اتمسفر بود. بسیارش دوم در ۲۰۰ اتمسفر انجام می‌گرفت و مقدار کمی اکسیژن به‌عنوان کاتالیزور به‌کار برده شد؛ دمای کار در حدود ۲۵۰ درجه بود.

راه‌های دیگری یافت شدند که به فشار بالا نیاز نبود. آقای کارل تسیگر که در انستیتوی ماکس پلانک مولهایم<sup>۱</sup> تحقیق می‌کرد توانست نخستین بسیارش را با تثبیت روی کلرور آلومینیم به‌عنوان پایان کار، در فشار پایین عملی کند. هنوز بسیارهای پایینی بودند که تنها از دو یا سه مولکول اتیلن تشکیل می‌شدند. چهار سال بعد وی توانست با گروه خود با همین روش، بسیارهای بالای اتیلن را بسازد و در ۱۹۵۴ با همکاری جولیو ناتا<sup>۲</sup> ایتالیایی بسیارهای یک رده اتیلن، پروپیلن  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$  را که متبلور شد، بسازند. این ماده جدید، بسیار سخت و محکم بود.

در طی همین سالها، شیمیدانهای مؤسسه فیلیپس پترولئوم در ممالک متحده آمریکا که از اکسیدهای کروم به‌عنوان کاتالیزور استفاده کردند توانستند اتیلن و اولفینهای دیگری را در فشار ۵۰ اتمسفر، بسیار سازند. فرآورده‌های به‌دست آمده، خصوصیتی بسیار مشابه فرآورده‌های تسیگر داشتند. مؤسسات دیگر نفتی، نظیر استاندارد اوایل ایندیانا در سالهای ۱۹۵۵ - ۱۹۵۶ با بهره‌گیری از طبیعت کاتالیزورها (نیکل، کبالت، اکسیدهای تیتان و غیره) در فشار (۵۰ تا ۱۰۰ اتمسفر) و گرما، باز هم روشهای دیگری را به‌کار گرفتند.

در کار تولید پولی‌اتیلنها با تنها یک نوع ماده خام، اتیلن یا هم‌رده‌های بلافاصله بالاتر آن، توانستند با استفاده از واکنشهای پیش‌بینی شده و تغییر شرایط بسیارش، یک ردیف مواد جدید به‌دست آورند.

سیلیکونها: چندی نگذشت که شیمی سیلیسیم و ترکیبات آن با کمپلکسی فراوان به میدان آمدند و شباهتهایی با شیمی کربن از خود نشان داد. زمانی گمان می‌بردند که می‌توانند یک ترکیب آلی سیلیسی، نظیر  $\text{R}-\text{Si}-\text{O}$  را به یک کتون تشبیه کنند، اما این گمان بی‌درنگ کنار گذاشته شد. چندین شیمیدان سیلیکونها را بررسی کردند و توانستند ترکیبات ساده‌ای از آنها را توضیح دهند. بین سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۹۴۰، شیمی سیلیسیم به‌طور کامل در آزمایشگاه شناخته شد؛ توجه و تمرکز پژوهشهای همه این شیمیدانها به این موضوع، صرفاً برحسب تصادف و به ساقه کنجکاوی بود و اتفاقاً بسیارهایی از ترکیبات سیلیسیمی آلی، به‌طور غیرمنتظره به‌دست آمدند.

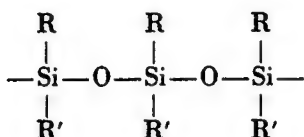
۱. Mülheim: شهری در قسمت رور، در مغرب آلمان-م.

تحقیقات اولیه در سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۸۸۰ بوسیله آقایان شارل فریدل و جیمز میسن کرافتس، و نیز فریدل و آلبرت لادنبورگ<sup>۱</sup> انجام گرفت. اما آقای ف. س. کیپینگ<sup>۲</sup> امریکایی بود که با کار در این زمینه در سالهای ۱۸۸۹ تا ۱۹۱۴، هسته اساسی دانش ساخت سیلیکونها را به دست داد. آقای کیپینگ بویژه در ۱۹۰۴ از واکنش گرینیار برای اجرای نخستین سنتزهای سیلیسیمی

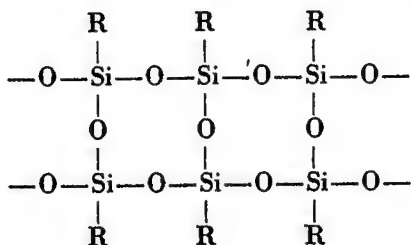
آلی استفاده کرد و آلکیل و آریل سیلوکسانها  $\begin{matrix} R & & Cl \\ & \diagdown & / \\ & Si & \\ & / & \diagdown \\ R & & Cl \end{matrix}$  را به دست آورد که در هیدرولیز تولید

سیلانولهای مربوطه  $\begin{matrix} R & & OH \\ & \diagdown & / \\ & Si & \\ & / & \diagdown \\ R & & OH \end{matrix}$  را می‌دهند. این ترکیبات، پایه سیلیکونها هستند. و با داشتن گروههای هیدروکسیل OH- در میعان، نخستین بسیار را می‌دهند.

در واقع این امکانات، فراوان هستند، زیرا R می‌تواند گروهی از ردیفهای خطی یا حلقوی باشد و می‌توان روی یک سیلیسیم، گروههای گوناگونی را وصل کرد، و نیز اگر یکی از آنها جای خود را به Cl بدهد، یک ترکیب پایه‌ای با سه OH- خواهیم داشت و بسپارش می‌تواند سه بعدی باشد. چنانچه میعان پلکانی (پولی‌کندانسانسیون) ترکیبی از نوع نخست، یک درشت‌مولکول خطی بدهد، می‌توان آن را چنین نمایش داد:



و برای نوع دوم شبکه‌ای به شکل زیر می‌دهد



در واقع پیکربندی این درشت‌مولکولها، بسیار پیچیده هستند.

این جنبه از شیمی ترکیبات سیلیسیمی آلی، تنها در ۱۹۴۱ به طور مشروح روشن شد. آقای کیپینگ که به تحقیقات خود تقریباً تا این تاریخ ادامه می‌داد، به آن علاقه‌مند نشد، هدف وی مشخص کردن ترکیبات ساده بود و زمانی که بسپارهایی به شکل چسبهای مایع به دست آورد از تحقیق چگونگی و مشخصات آن منصرف شد. اما گرچه آقای کیپینگ غرق در یک پژوهش اساسی

پربازده بود، جالب توجه است که هیچ یک از شیمیدانهای دیگری که به سوی تحقیق صنعتی روی آورده بودند کوششی برای پر کردن این جای خالی نکردند، آن هم در زمانی که تهیه مواد سنتزی، آنچنانکه در گذشته شرح داده شد، گسترش زیاد یافته بود. در واقع، مواد خام مورد استفاده، از ترکیبات کربنی متعلق به شیمی آلی محض بودند و مشتقات سیلیسیم هنوز گویا آماده تبدیلاتی از این ردیف نبودند. وانگهی، روشهای تحقیق درشت مولکولها، به تازگی و پس از کارهای شناودینگر و کراتز، بدرستی به کار گرفته می شد.

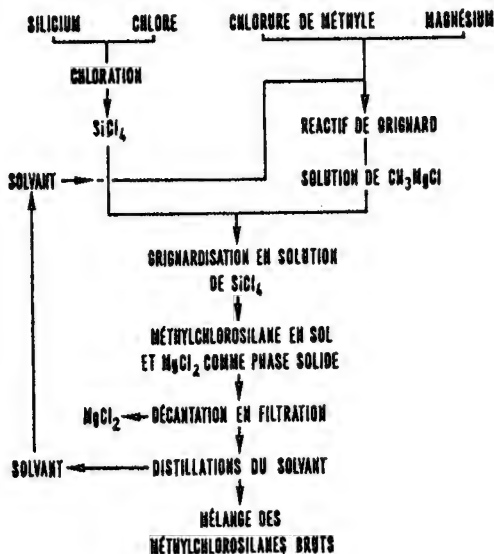
سرانجام بخاطر نیازهای صنعتی بسیار مشخصی، توجه به خواص در همجوشهای آلی سیلیسی شروع شد. شیشه گران و برقکاران به این نهضت تحقیق دودستی چسبیدند، نهضتی که تنها در آزمایشگاههای بسیار مجهز مؤسسات بزرگ می توانست به پیش رود. شروع کار، از ممالک متحده امریکا و در اواخر سالهای ۳۰ بود. مؤسسه امریکایی کورنینگ گلاوس ورکز یکی از شیمیدانها خود، آقای ج. ف. هاید<sup>۱</sup> را مأمور تحقیق آن چیزی کرد که عادتاً به آن سیلیکون می گفتند تا اینکه بتواند از شفافیت آن برای ساخت جسمی محکمتر از شیشه های آلی، با آمیختن آن با شیشه های معدنی استفاده کند. همچنین در نظر بود از خواص دی الکتریکی جالب توجه و نیز خاصیت آن در چسبندگی، برای تهیه مواد عایق از نوع سیمهای شیشه ای، استفاده شود.

نتایج نخستین کارهای هاید، مورد توجه شرکت جنرال الکتریک قرار گرفت. این شرکت نیز بنوبه خود، گروهی را زیر نظر آقایان و. ا. پاتود<sup>۲</sup> و ا. گ. روخو<sup>۳</sup> مأمور این تحقیق کرد. در سال ۱۹۴۱ روشی برای سنتز مستقیم سیلیکونها به توسط روخو یافت شد. در این روش سیلیسیم را مورد فعل و انفعال یک مشتق کلردار آلی در مجاورت مس قرار می دهند. مس در اینجا نقش کاتالیزور را دارد و کاربرد صنعتی آن آسانتر از استفاده از واکنش گرینیار است. باین حال، روش استفاده از واکنش گرینیار باقی ماند.

در طی چند سال، نه تنها روشهای ساخت پیچیده ای به کار گرفته شدند و انواعی از سیلیکونها تهیه شدند، بلکه تحقیق منسجم مشخصات آنها نشان داد که با خانواده ای از فراورده ها سرو کار داریم که امکانات کاربرد آنها بسیار گسترده تر از کاربرد هر خانواده بزرگ دیگری است که شیمی صنعتی تا کنون آن را شناخته است.

گوناگونی بی نهایت پیکربندی و روابط بین گروه بندیهای آلی / سیلیسیم در این درشت مولکولها، نوعی حالت های فیزیکی بدانها داده است که در روغنهای مایع دارای لزوجت، تا حالت کائوچویی و بالاخره جامد دیده می شوند. جالب ترین خواص فیزیکوشیمیایی آنها قدرت عایق برق و گرما

جدول ۴. ردیف واکنشها برای تهیه سیلیکونها.



بودن آنها، پایداری آنها در برابر آثار جوی و شیمیایی، آبگریزی، ناپسبناکی و بالاخره پایداری آنها در برابر گرماست. آنها را بر اساس ساختمان و حالت فیزیکی، برای کاربردهای حساس در ساخت مواد جنگی، از هر نوع: عایق، ولکانش پذیر، روانساز (یا رونواز)، ضد رطوبت و غیره برگزیدند. این همان چیزی است که تکنسین‌های امریکایی با علاقه آن را کشف کردند و به مجرد ورود امریکا به جنگ، این فرآورده‌ها، که برای ساخت آنها مدت‌ها و بی‌هدف حدود نیم سده تحقیق می‌کردند، یک‌باره در راه تولید صنعتی آن گام نهادند.

شرکتهای جنرال الکتریک، کورنینگ گلاس ورکز که در دوره پایانی و تحقیقات تب‌آلود با یکدیگر شریک شده بودند یکی از بزرگترین مؤسسه شیمیایی امریکا را با نام داوکیکال کمپانی Dow Chemical Co تشکیل دادند و در سال ۱۹۴۲ شعبه مشترکی را با نام داوکورنینگ کورپریشن Dow Corning Corporation تأسیس کردند تا نخستین تولید انبوه آن را تأمین کنند. در ۱۹۴۶ شرکت جنرال الکتریک با هزینه خود به ساخت سیلیکونها دست زد، و در انگلستان نیز ICI و میدلند سیلیکانز Midland Silicones همین کار را کردند. پس از آن، طی ده سال،

تولید سیلیکونها در همه کشورهای صنعتی جهان رایج شد.

زمینه کاربرد مواد سنتزی: سرانجام، طی این دوره سوم توسعه صنعت مواد سنتزی، تحول دیگری بیش آمد. این تحول مربوط به منابع فراورده‌های پایه‌ای اکثریت بزرگ مواد بود. پیش از آغاز جنگ جهانی دوم در چند سال پس از پایان آن، نقطه آغاز همانا ترکیب بسیار ساده موجود، استیلن، بود که در گذشته دیدیم که تولید آن چگونه به مرحله صنعتی رسید. اما اتیلن را نمی‌توان ندیده گرفت، گرچه قابل مقایسه با استیلن نبود. بتدریج که تکنیکهای صنعت نفت در سالهای ۵۰ تحول می‌یافتند، این منابع فراوانتر می‌شدند. سرانجام استیلن جای خود را، به‌عنوان فراورده پایه‌ای این صنعت بزرگ سنتزی به اتیلن وا گذاشت. کمی بعد خواهیم دید که این تحول چگونه انجام گرفت. صنعت شیمی با گرایش از مواد خام مصنوعی به مواد سنتزی، بتدریج و بعد با جهشهایی در طی دوده‌های اخیر، سلطه خود را بر همه صنایع و نیز تأثیر خود را بر همه جنبه‌های زندگی روزمره، گسترده ساخت.

در آغاز، این مواد جدید را به چشم فراورده‌های جانشین مواد سنتی می‌نگریستند. مواد سنتی در موقعیتهایی اقتصادی یا سیاسی ممکن بود کمیاب یا گران شوند، یا اینکه کیفیت آنها برای پاسخ‌گویی به نیازهای بیان شده، گرچه تا کنون رضایتبخش بوده‌اند، نسبت به مواد جانشینی در مرحله پاینتری قرار می‌گیرند. این مطلب در مورد باکلیت صادق بود، زیرا رزینهای قالبگیری شده یا صفحات آن، خواص دی‌الکتریکی یا مکانیکی بسیار جالبی داشتند که مواد سنتی فاقد آن بودند، وانگهی هزینه تولید و راه‌اندازی آن هم کمتر بود. اما این جنبه را می‌توان در موارد بسیاری نادیده انگاشت. مدتهای زیاد الیاف ریون از ابریشم گرانتر بود، اما منظره بسیار مواج و دلپذیری داشت و دیدیم که کائوچوی سنتزی اولیه، اغواکننده بود.

با این حال، پس از گذشت سه دهه نخست از سده کنونی، معیار داوری تغییر یافت. موادی که صنعت شیمی آنها را بهتر کرده‌اند. بیشتر به مواد تکمیلی تبدیل شده‌اند تا مواد جانشینی. بعضی از آنها طبعاً مواد طبیعی را لااقل در زمینه‌های بسیار مشخصی حذف کرده‌اند. کاربرد گوتا پرکا در ساخت عایقهای برق، در اواخر سالهای ۲۰ کنار گذاشته شد. کشتارهای سنتزی را با کائوچوی طبیعی، برای بهتر کردن خواص آن، می‌آمیزند و چنین مخلوطهایی در جاهایی که صمغهای طبیعی از عهده وظایف محوله بر نمی‌آیند به‌کار گرفته می‌شوند. برای استحکام تایرهای اتومبیلها و کامیونها، نخهای سنتزی به جای پنبه‌ای به‌کار گرفته شدند و ...

اگر رزینهای کلرور پولی‌وینیل برای جانشین صمغ لاک، در ساخت و نیز پرسکاری

صفحات بسیار کوچک با شیارهای بسیار نزدیک هم، در آن زمان موجود نبود تولید صفحات پردوام گرامافون بوسیلهٔ پترگلدمارک<sup>۱</sup> در سالهای ۱۹۴۵ - ۱۹۴۸ برای شعبه‌ای از Colombia Broadcasting System بدین خوبی انجام نمی‌گرفت. طبعاً پیشرفت در ضبط صدا و نیز پژوهش در ساخت بازویی بسیار سبک برای نگاهداری سوزن، مستلزم تکنیکهای دیگری بود که بسیاری از آنها از فراورده‌های صنایع شیمیایی کمک گرفته‌اند.

ما بر سر آن نیستیم که مراحل تحولی تکنیکهای گوناگون کاربردی را، تنها تحت تأثیر تهیه کردن مواد مصنوعی و سنتزی در زمینهٔ آنها بدانیم. پس از فن عکسبرداری که بی‌شبه نخستین زمینهٔ کاربرد این مواد است، صنایع برق نیز یکی از اولین و مهمترین استفاده‌کنندگان از این مواد بوده است و بعدها، بلافاصله پس از پایان جنگ جهانی اول، ساخت هواپیماها و اتومبیلها، تکنیکهای بسته‌بندی و تزئین، اپتیک عمومی و اپتیک دقیق، مکانیک، تجهیزات شیمیایی، وسایل اتاق جراحی، پیایی و حتی گاهی در یک زمان، دهه به دهه از گروههای کاربردهای پیوسته جدید بوده‌اند.

دستاوردها در نساجی: در این‌باره شمارش صرف این دستاوردها کافی نیست. بهتر است دستاوردهایی را هم که در زمینهٔ الیاف بافندگی بوده‌اند بیدرنگ به حساب آوریم. شمار زیادی از موادی که با کارهای شیمیایی بهتر شده‌اند می‌توانند در اثر گرم کردن، محلول یا ذوب شوند و از سوراخهای نخریز مدرجی بگذرند و به نخ تبدیل شوند. طبعاً تکنیکهای گوناگون کاری، پس از پیدایش نخستین الیاف سلولوزی برای انجام ریسندگی، کشش، شست‌وشو و غیره، بمنظور تهیهٔ انواع فراورده‌های مطلوب، پدید آمدند. وانگهی ساخت مواد تازه از راه هم‌بهار بمنظور افزایش گوناگونی انواع بسپارهای رایج، آغاز شد.

در کار ساخت بعضی الیاف طبیعی، مانند پنبه و کتان توانستند مثلاً در سایهٔ اختراع روش چروک‌ناپذیرسازی - که دستاورد پژوهش دراز مدتی بود که از سال ۱۹۱۸ تا ۱۹۳۲ با سماجت به‌وسیله گروه کوچکی از پژوهندگان، در استخدام شرکت انگلیسی Tootal Broadhurst Lee با مدیریت آقای سر کنت لی<sup>۲</sup>، پیگیری شد - موفقیتهایی در بهتر شدن کیفیت آنها پدید آورد. این روش صنعتی شده، شامل آغشته کردن نخها با موادی است که در جریان نوعی عملیات حرارتی، تشکیل رزینی روی خود نخ می‌دهند. علاوه بر نخ طبیعی، نخ مصنوعی یا سنتزی نیز می‌تواند از این روش بهره‌گیرد.

این نخها باید کوتاه باشند که از دستگاه ریسندگی مانند نخهای طبیعی بگذرند. نخستین هدف همهٔ پژوهندگان ساخت نخهای شیمیایی، به‌دست آوردن نخ طویل با گذراندن مایع دارای لزوجت

از دستگاه نخریز بود. اما در آن زمان که هنوز تنها نخهای سلولوزی را می شناختند، مقداری نخهای ردی باقی می ماند که بزودی اندیشیدند که با رسیدن آنها با وسایل ریسندگی معمولی، آنها را مورد استفاده قرار دهند. سپس طی جنگ جهانی اول، برای جبران کمبود الیاف طبیعی، بویژه پشمی، کاربرد الیاف کوتاه شیمیایی را که با قیچی کردن الیاف بلند به دست آمده بودند، سیستماتیک کردند. نخستین امتیازهای به ثبت رسیده، تاریخهای ۱۹۱۱ و ۱۹۱۳ را دارند؛ اما در سالهای ۲۰ بود که خامه سلولوزی به مقدار فراوان وارد بازار شد. این قیچی کردن نخها به الیاف کوتاه و عمل آوردن آنها، در همه فرآورده هایی که بعداً ساخته شدند تکرار شد.

بدین ترتیب، صنعت نساجی سرعت هم از لحاظ تعداد و هم از جنبه گوناگونی مواد خام، گسترش یافت و علاوه بر آن، مخلوط نخهای طبیعی و غیرطبیعی به این صنعت امکان داد که هرگونه کیفیت مطلوب مکانیکی و بافندگی نخهای ریسیده، تقریباً به طور کامل، به دست آید. الیاف طبیعی، که هرگز از دور خارج نشدند، مقام خود را در صنعت پوشاک، مثلاً برای رفع نیازهای مربوط به کیفیت پارچه ها حفظ کردند. با کاربرد نسبتی از الیاف شیمیایی، کیفیت آنها بهتر می شد. پس از جنگ جهانی دوم بود که کاربرد تار بریده staple سرعت تعمیم یافت.

نابافته ها: در این زمان فرآورده ای از نوع دیگر، «نابافته» به بازار آمد و کاربرد آن، در طی سالهای ۵۰ در ممالک متحده آمریکا و در دهه های بعدی در قاره های دیگر، گسترش یافت. در اینجا هم در برابر ما امکانات فنی بسیار زیادی قرار دارند. این امکانات، نخست مربوط به طبیعت الیاف کار شده، نه تنها طبیعت شیمیایی، بلکه ابعاد آنها می باشند: الیاف کوتاه به طول سه میلیمتر یا تار بریده که چهار تا شش سانتیمتر طول دارند. باز این امکانات مربوط به ترتیب الیاف، پس از پراکندگی آنها، یعنی وضع فتیله است. پژوهش در این زمینه، بویژه روی این مسایل و نیز روی وسایل فیزیکی مربوط به فتیله سازی، گردش هوا یا جریان آب، تمرکز داشت.

تکسین ها به ساقه کنجکاو در تحول، خواستند فتیله را با رشته های پیوسته انجام دهند که خود ساختار فتیله می توانست به دل خواه، تحت تأثیر بعضی عوامل فیزیکی در زمان ریسندگی، آماده شود. در واقع، در اینجا ما به پایان یک خط طویل پژوهش رسیده ایم که ریشه های آن به آغاز سده برمی گردد - خطی که در جریان دهه های پس از جنگ دوم به کار بردهای صنعتی منجر شدند. تهیه الیاف، مثلاً تارچه ای، که با روزنایی جرم مذاب یا محلول، طبق روشی که آقای کراتز در ۱۹۳۸ مطرح کرده است، برای ساختن فتیله های نابافته گسترش یافت. کاربرد چسبهای شیمیایی، افزایش الیاف ترموپلاستیک (گرم انرم) یا عمل آوردن مکانیکی بمنظور تأمین استحکام فتیله ها نیز



باید پیایی رواج گرفته باشند.

سرانجام، روشهای ساخت چنان گوناگون شدند که نابافته‌ها در ساخت ماهوت، چرمهای مصنوعی، پارچه‌های پوشاکی (آستریها و فراورده‌های ذوب چسبیده با اطو)، قواره‌هایی برای صافی در صنعت، کاغذهای سنتزی، فراورده‌های بسته‌بندی و غیره به‌کار گرفته شدند.

این چند عمل کلی مربوط به تحول صنعت نساجی تحت تأثیر نفوذ مواد شیمیایی را کارهای کوچک دیگری در تحول این مواد، تکمیل کرده‌اند. نظر این بود که این مواد شناخته شده را در کارالیاف تازه یا اختلاط تازه‌ای از الیاف به‌کار گیرند. بدین ترتیب ناچار از ایجاد مواد جدیدی برای اجرای کارهای تازه، تهیهٔ فنیله‌های منظم از طریق روزرانی و غیره بودند. چنانچه این مجموعه وسایل و امکانات را در همهٔ زمینه‌های صنعتی، که مواد مصنوعی و سنتزی در آنها راه یافته‌اند وارد کنیم، می‌توان تصویری از مقدار تأثیر صنعت شیمی معاصر در تحول همهٔ روشهای تولید صنعتی به‌دست‌آورد.

### مهندسی شیمی

تغییر شکل ساختار صنعت شیمی کلاسیک، چنانکه در دههٔ نخست این سده بود، به ساختار مهندسی شیمی، بتدریج و متناسب با پیشرفت رشته‌های تازه‌ای انجام گرفت که پیدایش و تکامل آنها را دیدیم. اما بخش دیگری از صنعت شیمی نیز در این تغییر شکل سهم بود، و آن شیمی صنعت نفت است که معمولاً و بنادرست آن را پتروشیمی (= شیمی سنگ) می‌خوانند، درحالی‌که باید پتروئوشیمی گفت.

پژوهش دربارهٔ هیدروژندهی: این پژوهش دقیقاً با آغاز این سده شروع شد. نخستین مراحل آن را با تاریخ نخستین تقطیر صنعتی نفت (صفحات ۶۴۰ تا ۶۴۲) دیدیم. آنچه که در اینجا باید تأکید کنیم مسألهٔ شعبات پژوهشهای آزمایشگاهی دربارهٔ هیدروکربنهاست که زمانی پدید آمد که شروع به استفاده از هیدروکربنها به‌عنوان سوخت در موتورهای احتراقی شد. اما در تحقق این روش مهم عوامل دیگری هم مؤثر بودند که اولین آنها پراتیک سنتز صنعتی آمونیاک بر پایه نیتروژن و هیدروژن بود. این کار در واقع بخش بزرگش بر پایهٔ واکنشهای هیدروژندهی بود که نخست، تکنیکهای مهم این صنعت تازه را پی‌ریزی کردند: هیدروژندهی به اکسید کربن، هیدروژندهی زغال‌سنگ در اول و سپس هیدروژندهی هیدروکربنها، بعداً. اما بعدها در پایان سالهای ۳۰، واکنشهای هیدروژن‌زدایی بود که برای تهیهٔ مواد خام این صنعت بزرگ، اهمیتی خاص یافت.

گاه‌شماری تحولات صنعت شیمی در این زمینه طی سدهٔ ۱۹۱۰ - ۱۹۶۰، کار بسیار

دشواری است. صنعتی که یکی از بخشهای بسیار مهم اقتصاد سراسر جهان را تشکیل می‌دهد. شاید پایه این جنبش بزرگ را بتوان بر پژوهشهای آزمایشگاهی قرار داد، که به‌نظر نمی‌رسد کاربردهای صنعتی یافته باشند. یکی از کهنترین آنها جزء کارهای برتلو درباره سنتزهای بنیانی ترکیبات آلی بوده است: استیلن، الکل اتیلیک، اسید استیک و غیره. آقایان پل و آرنو (پسر و نوه آقای تشار شیمیدان)، نخستین کسانی بودند که در سال ۱۸۷۳ با قرار دادن مخلوطی از هیدروژن و اکسید کربن تحت تأثیر تخلیه‌های برقی، یک مایع روغنی به‌دست آوردند. سی سال بعد آقایان پل ساباتیو و ژان باتیست ساندرن<sup>۱</sup> برای نخستین بار، هیدروژندهی کاتالیزوری اکسید کربن و انیدرید کربنیک و نیز تبدیل آنها به متان را عملی کردند. کاتالیزورگر این عمل، نیکل و دمای کار حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه بود.

امتیازهای متعددی در سالهای بعد در مورد ساخت متان از طرف ساباتیو و ساندرن در سال ۱۹۰۵ و نیز از سوی شیمیدانهای انگلیس و آلمان به ثبت رسیدند، اما هرگز مورد استفاده قرار نگرفتند. مانع اصلی این کار، دشواری خالص کردن گاز آب بود.

در طی این دهه‌ها، ترکیب نفتهای حوضه‌های مختلف رفته رفته بخوبی شناخته شد، اما باز هم درباره نوع و درصد هیدروکربنهای آن شک و تردیدهایی باقی ماند، بدون آنکه از سازاهای دیگری که در این مخلوط بسیار متنوع وجود دارند سخن بگویم. وانگهی، کوشیدند تا از راههای تجربی، هیدروکربنهای با وزن مولکولی زیاد را از نو بسازند - کاری که تنها برای اثبات یا رد نظراتی درباره پیدایش نفت انجام می‌گرفت.

ساباتیو و ساندرن با گسترش هیدروژندهی به استیلن و استفاده از نیکل به‌عنوان کاتالیزور در سال ۱۹۰۵ یک ردیف هیدروکربنها را تا حد فراورده‌های مایع و نیز فراورده‌های تراکم استیلن به کربورهای آروماتیک به‌دست آوردند - کاری که در آن زمان سنتز نفت خوانده می‌شد. آقای ولادیمیر ن. ایپاتیف شیمیدان روس که در شیکاگو کار می‌کرد، بنوبه خود «سنتز» نفت را با بسپارش اتیلن در دماهای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه، بدون کاربرد کاتالیزور، در سال پس از آن عملی کرد. ایپاتیف در این زمان به‌مناسبت اینکه در سالهای ۱۸۹۲ - ۱۸۹۶ روشی برای سنتز ایزوپرن (کربور اشباع نشده‌ای که در آن زمان می‌دانستند که ترکیب اساسی کاتوچو می‌باشد) پیشنهاد کرد مشهور شده بود.

پژوهشهای دیگر وی در مجاورت کاتالیزور و در فشار انجام گرفته بودند. وی از فشارهای ۵۰۰ اتمسفر و بیشتر استفاده می‌کرد. در این دوره چنین روشهایی، با بدبینی تلقی می‌شد و بویژه ساباتیو بدانها اعتقاد نداشت زیرا از «هیپرپرسیون» برای سنتز آمونیاک استفاده شده بود. آقای

ایپاتیف همچنین از نخستین شیمیدانانی بود که کاتالیزور هتروژن و فعالیت کاتالیزوری شمار زیادی از ترکیبات معدنی مخصوصاً اکسیدهای فلزی را بررسی کرده بود.

او در جریان کارهای خود یک ردیف تمام از هیدروکربنها را به دست آورد. سپس به کار بسپارش گازهای کراکینگ روی آورد. یکی از کاتالیزورهای مورد استفاده وی، اسید فسفریک بود که بعداً در سال ۱۹۲۷ در آلمان برای همین منظور به کار گرفته شد.

از مشخصات سالهای پیش از جنگ جهانی اول، انجام پژوهشهای مربوط به گسترش روشهای هیدروژندهی جهت سنتز آمونیاک با مواد دیگری جز نیتروژن بویژه با زغال سنگ، لینیت، روغنها و قطران است. آقای فریدریش برگیوس<sup>۱</sup>، شیمیدان آلمانی، نظریه این روش را بیان داشت و در ۱۹۱۳ نخستین امتیازها را به نام خود به ثبت داد. تهیه هیدروکربنها با این روش، نتیجه کارهایی است که برگیوس مدت چند سال برای تعیین منشأ زغال سنگ و نفت انجام داده بود. اما روشهایی که وی به ثبت رسانیده بود تا سالهای ۱۹۲۴ - ۱۹۲۶، یعنی زمانی که آقای پیر<sup>۲</sup> مولیبدن و تنگستن را به عنوان کاتالیزور به کار گرفت و جریان عملیات به یک فاز مایع و سپس فاز بخار تقسیم شد، نمی توانستند در صنعت به کار روند. برگیوس در ۱۹۲۵ حقوق همه امتیازات خود را به BASF فروخت.

در سال ۱۹۱۳، باز هم BASF، اختراعاتی را برای هیدروژندهی به اکسید کربن به ثبت رسانید، در این زمان، امکان تهیه شمار زیادی ترکیبهای شیمیایی از آن را پیش بینی می کردند و بزرگترین دشواری کار این بود که نمی دانستند که آیا امکان هدایت مناسب واکنش برای تهیه فراورده‌های معین و پرهیز از تشکیل مخلوطهای هیدروکربن و ترکیبات اکسیژنداری که جدا کردن آنها در محدوده اقتصادی غیرممکن است، وجود دارد یا خیر؟

دوران مخاصمات و سالهای بلافاصله پس از جنگ، کاربرد آنچه را که وجودش لازم می نمود به عقب انداخت. دیده شد که کوششهای شیمیدانهای آلمان، متوجه راه اندازی ساخت آمونیاک سنتزی و اسید نیتریک شد. پژوهشهایی که به تازگی راه به جایی برده بودند در سال ۱۹۲۲ با کوشش بیشتر به پیش کشیده شدند و میدان کاربرد آنها در بیست سال بعد چنان گسترده شد که در یک زمان در جهات مختلف توسعه یافت.

روش سنتز: از میان فراورده‌های هیدروژندهی به اکسید کربن، یکی هم متانول،  $\text{CH}_3\text{OH}$ ، ساده ترین همه الکلهاست. تا آن زمان این الکل را از تقطیر چوب در ظروف در بسته به دست می آوردند، و ماده خام مهمی برای صنعت شیمیایی به شمار می رفت. ردیفی از اختراعات BASF

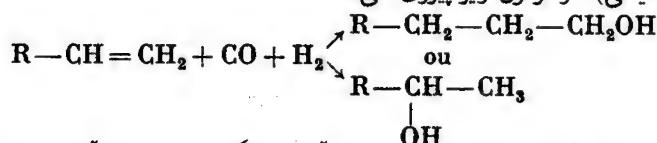
که در ۱۹۲۳ و ۱۹۲۴ به ثبت رسیدند شامل ساخت سنتزی متانول بر پایه گاز آب که در فشار انجام شده است و کاربرد همه کاتالیزورهای ممکن در دماهای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه بود. در گروههای زیادی که برای ساخت این ماده کار می کردند، آقای الوین میتاش هم بود که در عملی کردن سنتزهای نیتروژن شرکت کرده بود. این مؤسسه آلمانی در سایه تجربیاتی که به دست آورده بود توانست تولید متانول خالص را تقریباً پیدرنگ شروع کند. در برهه بین دو جنگ جهانی در آلمان برای برپا کردن چندین واحد تولید این ترکیب، کوشش خاصی به عمل آمد. کارخانه هایی که فعلاً در آلمان غربی قرار دارند ۱۸۰۰۰ تن متانول در ۱۹۲۸ و ۱۲۸۰۰۰ تن در ۱۹۴۴ تولید داشتند. در فرانسه، نخستین تولید متانول سنتزی، کمی پس از آلمان، در کارخانه شرکت کولمن واقع در بتون<sup>۱</sup>، بر پایه کارهای ژ. پاتار عملی شد که بویژه اثر اکسید روی و مس را به عنوان کاتالیزور تحقیق کرده بود. حلال صنعتی، ضدیخ، مضاف به سوختها و پروپروگولها، نقطه آغازی برای تهیه آلدهید فورمیک، اسید استیک، کلرو استات متیل، متانول، پایه شمار مهمی از ساختهای بزرگ است.

در زمانی که سنتز متانول توسعه می یافت، درصدد برآمدن تا از همین اصول برای ساخت فرآورده های بالاتر استفاده کنند، اما تنها نتایجی که برای صنعت داشت، مواد مربوط به ساخت الکل

ایزوبوتیلیک بود. ایزوبوتیلیک  $\begin{matrix} \text{CH}_3 \\ \text{CH}_3 \end{matrix} > \text{CH}-\text{CH}_2\text{OH}$  امتیازهای اولیه در سال ۱۹۲۳ بوسیله BASF

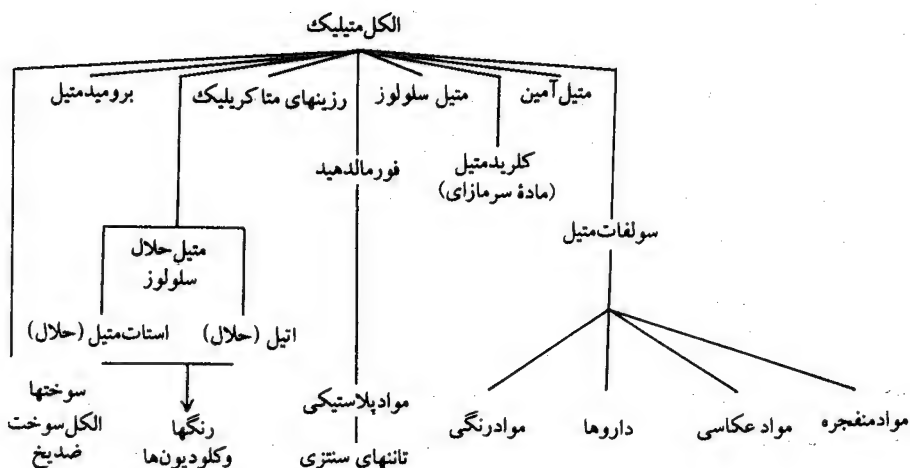
به ثبت رسیدند. این الکل، مصرف صنعتی فراوان داشت؛ اما برای آلمان، سود آن در امکان تبدیل به ایزوبوتیلن جهت ساخت کائوچوی سنتزی بود.

وانگهی این روش ساخت الکل ایزوبوتیلیک، سودمندی خود را طی سالهای پنجاه از دست داده بود، درحالی که روش تهیه الکلهای ردیف بالا، در نتیجه تأثیر اکسید کربن و هیدروژن بر اولفینها (کربورهای دارای پیوند اتیلنی)، از فرمول زیر پیروی می کند:



این نوع واکنش به اصطلاح اوکسو oxo کمی پیش از آغاز جنگ دوم بوسیله آقای رولن<sup>۲</sup> شیمیدان آلمانی برای یکی از مؤسسات مبتکر در سنتز متانول، Ruhrchemie AG بررسی شده بود. این روش در جریان جنگ برای تولید الکلهای چرب به منظور ساخت مواد پاک ساز، تکمیل شد. اما شرایط اقتصادی پس از جنگ امکان کاربرد آن را در آلمان نداد و حال آنکه ممالک متحده آمریکا و انگلستان که کربورهای اتیلنی را بسیار آسان به دست می آوردند، آن را

## جدول ۵. کاربردهای الکل متیلیک در صنعت الکل متیلیک



عملی ساختند. بدین علت بود که الکل‌های بالا و مشتقات آنها، که تا آن زمان نسبتاً کمیاب بودند، به فراوانی روانه بازار شدند.

این نمونه نشان می‌دهد که تکنیک‌های شیمی صنعتی پس از جنگ جهانی دوم، تا چه اندازه در تحول انعطاف یافته بودند.

سنتز فشر-تروپش: آقای میتاش که در سنتز آمونیاک، نقش داشته است، کمی بعد به اتفاق آقای شنایدر با تحت تأثیر قرار دادن گاز آب به کاتالیزورهایی که از اوسمیم و کبالت ساخته شده بودند، همراه با فشار و گرما، هیدروکربنهایی با کربن بالا، تهیه کرد. این دستاورد، پس از سنتز کردن متانول با همکاری آقایان پیر و ک. وینکلر بود. در همین زمان آقای فرانکس فشر که او نیز به این پژوهش دلبسته بود، تهیه هیدروکربنها را ادامه داد. وی همراه با همکارش تروپش در ۱۹۲۱ در انستیتوی کایزر ویلهلم (بعدها به انستیتوی ماکس پلانک تغییر نام داد) واقع در مولهایم نخست سینتول را ساخت.

فراورده‌ای که با این نام ساخته شد، آمیزه‌ای از ترکیبات اکسیژندار و همرده‌های آلیفاتیک، اسیدها، الکلها، ستونها، آلدئیدها بود. واکنش مخلوط اکسید کربن هیدروژن در دمای ۴۰۰ درجه و

۱۰۰ اتمسفر فشار در مجاورت کاتالیزور انجام می‌گرفت. synthol که باز هم در فشار گرم می‌شد به synthin آمیزه هیدروکربنهایی که بی‌درنگ به عنوان سوخت به‌کار گرفته شد، تبدیل شد. فیشر و تروپش به مدت چند سال بررسی این تبدیلات را ادامه دادند. آنها ثابت کردند که چنانچه فشار واکنش را پایین آوریم درصد هیدروکربنهای تشکیل شده در برابر درصد ترکیبات اکسیژندار بالا می‌رود،

سرانجام در ۱۹۲۵ که کاتالیز خود را تکمیل کرده بودند توانستند سنتز هیدروکربنهای بالا را در دمای نسبتاً پایین ۲۰۰ - ۲۵۰ و فشار اتمسفر، انجام دهند. اما برای اینکه به راه‌اندازی روش فیشر - تروپش و تهیه طرح واحدهای تولید آن اطمینان حاصل شود لازم بود که حدود ده سال دیگر بگذرد. نخستین واحد تولید آنها در آوریل ۱۹۳۶ راه افتاد و پیش از پایان همین سال سه واحد دیگر آماده شدند و با یک ضربه، ظرفیت تولید اولیه نفت سنتزی به ۲۰۰۰۰۰ تن در سال رسید. این کوششها هم برای اصلاح روشها و هم بمنظور افزودن تجهیزات با سرسختی پیگیری شد. خود این روش پیوسته متحول می‌شد. در ۱۹۴۴ پس از یک مبادله اطلاعات بین کارخانه‌های آلمان، توانستند این واکنش را در فشاری متوسط و در مجاورت کاتالیزور «آهن» (چون کبالت بسیار کمیاب شده بود) انجام دهند. تعداد این کارخانه‌ها به رقم نه رسید و ظرفیت تولید آنها، چنانچه شش کارخانه در اثر خرابی، تعطیل نمی‌شدند، در سال به ۷۴۰۰۰۰ تن بالغ می‌شد. تولید واقعی آنها در ۱۹۴۲ برابر ۵۵۲۰۰۰ تن بود که در ۱۹۴۴ به کمتر از ۲۷۹۰۰۰ تن رسید.

دیده می‌شود که سنتز متانول و سنتز هیدروکربنها بر اساس گاز آب، که مخلوطی از اکسید کربن و هیدروژن است، لااقل در اصول به یکدیگر نزدیک هستند. ممالک متحده امریکا کمی پیش از سال ۱۹۳۰ به سنتز متانول علاقه‌مند شد و پس از جنگ جهانی دوم بروش گاز آب نخستین کارخانه در ۱۹۴۹ گشایش یافت. کشورهای دیگر کمی پیش از این مملکت، به هر دو سنتز روی آورده بودند.

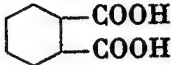
هدف سنتز نخست که تهیه سوختهای سنتزی بود بعدها اولویت خود را از دست داد؛ اما سنتز فیشر - تروپش با اصلاحاتی که در آن شد بر تحول صنعت شیمی اثر مهمی گذاشت: این سنتز منبعی برای شمار زیادی از فراورده‌های واسطه‌ای شد که پس از جداسازی و عمل آوردن آنها در رأس فهرست این مواد جای داده شدند. این فرصتی برای پیشرفت فن کاربرد کاتالیزورها بود - چیزی که به سود تکثیر روشهای کراکینگ و رفرمینگ هیدروکربنهای طبیعی تمام شد. سرانجام این کار، ارزیابی مجدد اهمیت شماری فراورده‌های استخراجی زغال‌سنگ، لینیت، تورب

مشخصه گروه‌های معین را نشان می‌دهد، مثلاً  $1.54 \text{ \AA}$  برای پیوند میان دو کربن راست زنجیر، و  $1.42 \text{ \AA}$  را میان دو کربن و زنجیر حلقوی، و  $1.32 \text{ \AA}$  را برای پیوند اتیلنی،  $1.19 \text{ \AA}$  برای پیوند استیلنی و غیره\*.

در اواخر سالهای ۳۰، مجموعه جالبی از روشهای فیزیکی در دسترس دانشمندان شیمی آلی قرار گرفت که در آن زمان برای اجرای سنتز اجسام تازه‌ای تلاش می‌کردند و نیز همان‌طور که دیدیم، انواع و اقسام واکنشهای شیمیایی بسیار انعطاف‌پذیر در اختیار آنان بود.

نخستین نزدیکی به مواد سنتزی: می‌توان تقریباً سه دوره را در پیدایش صنعت مواد سنتزی تشخیص داد. از آغاز این سده تا پایان جنگ جهانی اول، چند اقدام اولیه و محدود در فضای آزمایشگاهی انجام گرفت.

آقای اوتو رُم<sup>۱</sup> از سال ۱۹۰۰ بررسی ترکیبات آکریلیک و متاکریلیکی را که از اسیدهای مربوطه  $\text{CH}_2=\text{C}-\text{COOH}$  یا از نیتریلها مشتق می‌شوند آغاز کرد. وی  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$  و  $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$  شاهد پدیده‌های بسپارشی بود که این ترکیبات ایجاد می‌کنند. اما سی سال پس از این تاریخ، یعنی در دوره دوم بود که صنعتی شدن ساخت این بسپارها، همزمان در انگلستان، ممالک متحده امریکا و آلمان عملی شد.

آقای اسمیت در سال ۱۹۰۱ با استری کردن اسید فتالیک  یا با انیدرید

این اسید به کمک گلیسرین، نخستین ترکیب گلیسروفتالات را ساخت. این اسید در آن زمان، فرآورده واسطه‌ای ساخت اندیگو بود. بررسی این استری کردن، راه را در سال ۱۹۲۷ برای تهیه روغن خشکانه (سیکاتیف) مصنوعی، و نیز بسپارش آنها، که در ساخت رنگ کاربرد دارد، باز کرد.

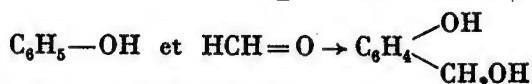
بسپارهای کلونیدهای وینیل  $\text{CH}_2=\text{CHCl}$  و دیگر ترکیبات وینیلی، مثلاً استات وینیل و

وینیل بنزن یا استیرولن (استیرن)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$  موضوع تحقیقات آقای کلاته<sup>۲</sup> در سالهای ۱۹۱۲ - ۱۹۱۴ بود. طی جنگ جهانی اول، همین شخص در آلمان ساخت کلراستات پولی وینیل را که بعدها بنفع استات کنار گذاشته شد، شروع کرد.

این دوره اول با تولید نخستین کائوچوی سنتزی هوفمان، که درباره آن سخن گفته‌ایم، نیز مشخص می‌شود.

\* یادآوری می‌شود که  $\text{\AA}$  یا آنگستروم برابر یک دهم میلیونیم یک میلیمتر است.م.

بسیارشهای صنعتی: دوره دوم اوایل سالهای ۳۰ آغاز می شود، گرچه واقعاً در ادامه کوششهای دانشمندی از شیمی آلی که برای صنعت کار می کردند گسستگی وجود نداشته است. در واقع در طی این تأخیر آشکار انتقال بود که در سایه پژوهشهای شتاودینگر و گروه وی، نیز تعداد زیادی شیمیدانها و فیزیکدانانی که بویژه در آلمان و امریکا کار می کردند درباره ساختار درشت مولکولها، که قبلاً ذکر آنها رفت، آگاهیهای تازه ای به دست آمد. سالهای ۳۰ با آغاز تولید صنعتی بسیارهای بزرگ یا هم بسیار (کوپولیم) های سنتزی مشخص می شود. در همین سالهاست که روشهای گوناگون بسیارش قابل استفاده در مقیاس صنعتی کشف شدند. در حقیقت این مشکل روز بود، مشکل انتقال سنتز درشت مولکولها از آزمایشگاه به کارخانه. گرچه به فهم مکانیسمهای شیمیایی بسیارش: پیوند عامل به عامل (مثلاً عامل آمین به عامل اسید، چیزی که آقای والاس هیوم کراتز<sup>۱</sup> بعدها آن را بررسی کرد)، میعان و تراکم همراه با حذف آب از نوع:



که اکنون به طور تجربی، صنعتی شده است، یا بسیارشهایی از راه افزایش روی پیوند اتیلنی، که در آنها شاهراهی به سوی یک کاتالوگ غول پیکر از فراورده های تجارتی باز شد، دست یافته بودند کاربرد این فرایندها در صنعت، مستلزم اصلاح شماری از روشهای کلی بود که هر یک از آنها در ردیفهایی از ترکیبات واسطه ای کاربرد داشتند. تقریباً طی ۲۰ سال میان ۱۹۳۰ - ۱۹۵۰ این تکنیکها بررسی و روبه راه شدند، اما این بدان معنی نیست که این تکنیکها بعدها دستخوش تحول نشده اند. مشکل کار، تعیین محیط و شرایط فیزیکوشیمیایی بود که بسیارشها باید در هر مورد برای رسیدن به بهترین بازده، چه کمی و چه کیفی، واجد آنها باشند. در واقع، با درجه مورد نظر بسیارش، که با این یا آن روش کلی موجود به دست می آمد، روش تولید عبارت خواهد بود از راه امولسیون در واکنشگاه (راکتور) ها و حضور بعضی کاتالیزورها، یا راه محلول کردن تکپار (مونومر) با رسوب دادن بسیار.

بسیارهای وینیلی: با استفاده از فرایند تعلیق در امولسیون بود که بسیارهای وینیلی که بیست سال پیش بوسیله آقای کلاته بررسی شده بودند برای نخستین بار تهیه شدند. مهمترین این بسیارها، ترکیبات آکریلیکی و متاکریلیکی هستند که مؤسسه آقای اوتو ژم و همکارش آقای هاس در آلمان در سال ۱۹۲۷ ترکیبات نخستین و در سال ۱۹۳۵ - ۱۹۳۶ ترکیبات متاکریلیکی را ساختند. ساخت ترکیبات پلی متاکریلات صنعتی در مدت نسبتاً کمی در سال ۱۹۳۱ بود و برکارهای آقای



چالمرز<sup>۱</sup> کانادایی تکیه داشت. آقای چالمرز کشف کرد که متاکریلات اتیل و نیز نیتریل متاکریلیک می‌توانند متحمل نوعی هم‌بسپارش شوند، و این یک شیشه‌آلی واقعی با خواص نوری جالب توجه است. شیشه‌های متاکریلیکی را مؤسسات بزرگی در آلمان، انگلستان و امریکا حدود سال ۱۹۳۶ در مقیاس صنعتی تولید کردند و با نامهای گوناگونی: لوسیت بوسیلهٔ دوپون دنومور، پلکسی‌گلاس بوسیلهٔ شعبات امریکایی ژم و هاس به فروش می‌روند. همین نام اخیر است که در فرانسه، آلمان و ایتالیا بسیار شهرت دارد.

مشتقات دیگر آکریلی در همان زمانها یا کمی بعد مورد استفاده قرار گرفتند. مثلاً آکریلونیتریل بتدریج از سال ۱۹۴۱ موضوع پژوهش آقای هیل چارج<sup>۲</sup> از دوپون دنومور برای ساختن الیاف سنتزی بود درحالی‌که شیمیدانهای بایر در آلمان در سال ۱۹۴۲ به همین پژوهش دست زدند. امریکاییها که تقدیر با آنان همراه بود در سال ۱۹۴۸ اورلون را به بازار فرستادند، و در آلون ساخت آلمان شش سال بعد ساخته شد.

در دورهٔ پیش از جنگ، ساخت پولی‌وینیلها در کشورهای نوآر در شیمی صنعتی سنتزی بسرعت به پیش رفت. چون ردیف ترکیبات وینیلی بسیار طولانی است بنابراین، فهرست فرآورده‌های بسپارش یا هم‌بسپارش آنها نیز مفصل است. در سال ۱۹۳۱ کلرور پولی‌وینیل سبب شد که یک فرآوردهٔ پرکلری محلول در استون ساخته شود و در آلمان به شکل نخ ریسیده برای صنعت و با نام PeCe به بازار آید. این کلرید پولی‌وینیل که بعدها به پی‌وی‌سی PVC شهرت یافت، ساخت این نوع مواد را توسعه داد - موادی که با افزایش روشهای عمل آوردن آنها، استفاده از مواد نرم‌کننده و تحویل آنها در شکل ورق، مفتول، خمیر و غیره، کاربردهای بسیار گوناگونی یافتند. در فرانسه یک نوع الیاف کم کلر را آقای ژ. کوربیر<sup>۳</sup> در سالهای ۴۰ برای رودی‌آستا Rhodiacéta روبه‌راه کرد که در سال ۱۹۵۰ با نام rhovyl وارد بازار شد.

هم‌بسپارش مشتقات وینیل با یکدیگر، چشم‌انداز تنوع فرآورده‌ها را باز هم گسترده‌تر کرد. باید ساخت مشتقات فلوئوری، مانند تترافلوئور اتیلن را که تنها دارای کربن و فلوئور است و امکانات هم‌بسپار شدن آن را شرکت دوپون دنومور در سال ۱۹۴۱ پیش‌بینی کرده بود، نیز در نظر گرفت. چند سال بعد این پارافینهای فلوئوردار که نسبت به عوامل شیمیایی کاملاً غیرحساس می‌باشند نخست با نام تفلون، پس با نامهای دیگر روانهٔ بازار شدند.

کشپارهای سنتزی: مواد واسطه‌ای با پیوندهای اتیلنی، در همین دوره به ساخت کشپار (الاستومر)های سنتزی در همه کشورهای، بویژه در آلمان، ممالک متحدهٔ امریکا و

اتحاد جماهیر شوروی [سابق] رسیدند. این ماده احتمالاً بسیار سریع وارد مرحله ساخت صنعتی شد. آموخته‌های جنگ جهانی اول، عوامل اقتصادی و سیاسی میان دو جنگ، آلمان را برانگیخت که بویژه در سالهای ۳۰ به فراورده‌های جانشینی توجه کند تا از نیازمندی به ماوراءبحار آزاد شود. روسیه هم در دوره نزدیک به جنگ، همین احساس را داشت و ممالک متحدۀ امریکا، پس از شروع تجاوز ژاپنی‌ها، به کارهای خود شتاب زیاد دادند.

بررسی‌ها، نخست روی بسپارش کربورهای دی‌انی تمرکز یافت که در زنجیرهای خود، دو پیوند دوگانه داشتند تمرکز یافتند. تکیار پایه‌ای آن بسیار ساده، بوتادی‌ان  $H_2C=CH-CH=CH_2$  است که واکنش بسپارش روی زنجیر آن مدتها مورد بررسی بود. حدود سال ۱۹۲۹ شیمیدانهای I.G. Farben Industrie متوجه شدند که با عملی کردن هم‌بسپارش بوتادی‌ان و استیرن، تشکیل ساختار پرشاخه را، که عمل آوردن آن بسیار دشوار است، دور بزنند. بنابراین، آنان از سال ۱۹۳۷ ساخت یک ردیف بونا S را با نشانهای  $S_1$  و ...  $S_7$  شروع کردند. این ردیف که همگی در زمان جنگ ساخته شدند به‌طور منظم به انواع دیگری از بونا گسترش یافتند که مزایای فراوان داشتند.

در همین واکنشهای بسپارش است که امریکاییها در سالهای ۱۹۴۲ - ۱۹۴۴ به بازکردن یک ردیف GR-S (Government Rubber-Styrene) تشویق شدند. روسها از سال ۱۹۳۲ در سایه کارهای آقای سرگنی لب‌دف بسپارهای بوتادی‌ان را، که مشابه بونا‌های اولیه آلمانها بودند و با حروف SKA و SKB (کائوچوی سنتزی Synthetics Kaoutchoucs) مشخص می‌شدند، می‌ساختند و سپس یک هم‌بسپار بوتادی‌ان استیرن SKS را نیز ساختند.

اما راه دیگری هم بیدرنگ باز شد، راهی که با کاربرد کلرور دی‌وینیل  $H_2C=CH-CH=CH_2$  یا کلروپرن به پیش رفت. از سی سال پیش می‌دانستند که بعضی از مشتقات کلردار کربورهای اشباع نشده می‌توانند با بسپارش، جسم کشسانی بدهند که هیچ‌کس تا آن زمان کوششی برای تبدیل آن به کائوچوی مصنوعی نکرده بود. در واقع مسأله به کلرور دی‌وینیل استیلن مربوط می‌شد که آقای نیولانت<sup>۱</sup> آن را از استیلن ساخته بود. شیمیدانهای دیگری، بویژه آرنلدم. کالینز در آزمایشگاههای دوپون دونمور از نو به آن پرداختند. آقای کالینز بر اثر القاهای کراتز توانست در سال ۱۹۳۱ کلروپرن را تهیه کند و بسپارش آن را به یک کشپار سبب شود. این کشپار با نام ثوبرن شناخته شد و چند سال بعد، ساخت صنعتی آن آغاز گشت. این نیز ردیف طویل دیگری را تشکیل داد که شاخه‌های متعددی داشت و فراورده سوپرن در شوروی و بعدها پرونان C آلمان به این ردیف تعلق دارند.

به دنبال بسپارش ایزوپرن  $\text{CH}_2 = \underset{\text{CH}_3}{\text{C}} - \text{C} = \text{CH}_2$  هم بسپارش بوتادی‌ان با ترکیبات دیگر

وینیلی، از جمله آکریلونیتریل و غیره، تنوع کسپارهای مصنوعی را باز هم بیشتر کرد. واکنش ساده شیمیایی که در هر مورد روی کاغذ نوشته می‌شود، برای ساخت صنعتی آن کافی نبود. می‌بایست مسائلی متعدد مربوط به روشهای رایج: نوع و طرز کاربرد مواد امولسیون کننده، ترکیبات اولیه و اکشن، اثر کاتالیزورگرها و دمای واکنش (کشف سال ۱۹۴۱ سیستمهای به اصطلاح «ردوکس» اکسایش و کاهش» به پیشرفت سرعت بخشیدند) و طبعاً ساختار و ترکیب تجهیزات کار را حل کرد. اگر به این مسائل، دستکاریهای لازم برای تکمیل فرآورده‌ها را متناسب با کاربردهایی که برای آنها در نظر گرفته شده است اضافه کنیم متوجه می‌شویم که این، تکنیک صنعتی بزرگ و جدیدی است که در کمتر از دو دهه به بار نشسته است.

سرانجام باید گفت که این کوششهای خلاقانه، پس از جنگ هم سستی نگرفت، زیرا کسپارهای مصنوعی، مشخصاتی تا آن اندازه گوناگون و رضایتبخش دارند که دیگر نمی‌توان آنها را همچون فرآورده‌های ساده جانشین کائوچو دانست؛ موادی هستند که باید کاربرد ویژه آنها در صنایع متعدد، یا تکنیکهای کاربردی آنها را یافت.

پولی‌آمیدها: رده دیگری از بسپارهای سنتزی که در دوره دوم آفرینندگی پدید آمد، پولی‌آمیدها هستند. سرگذشت نسبتاً کوتاهی دارند، زیرا هنوز ده سال از پیدایش آنها نگذشته است. این رده از چند لحاظ نمونه است. اول اینکه، پولی‌آمیدها گرایشی را به طور قاطع ثابت کردند که در این دوره همیشه تأیید شده است، و آن اینکه، پژوهش برای یافتن مواد تازه، دیگر نباید کوششی برای دوباره‌سازی مواد طبیعی باشد. تصادفاً مسأله مربوط به تهیه نوعی الیاف بافتندگی بود که بتواند جانشین ابریشم شود. شیمیدانها به این باور رسیدند که گرچه ترکیب شیمیایی ابریشم، شناخته شده است، اما ساخت مصنوعی این الیاف طبیعی محال می‌نماید.

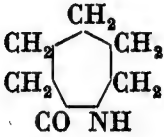
بعداً این رده، کارایی پژوهشی را ثابت می‌کند که بدون اینکه در آغاز، هدف مشخصی داشته باشد انجام گرفته است. آقای والاس هیوم کراتز از سوی دوپون دونور، در ۱۹۲۸ با عنوان کارشناسی بسپارهای بالا، خارج از یک برنامه معین کاری، به این پژوهش اقدام کرده بود. سرانجام، «اختراع» نایلون ۶۶ میدانی را در برابر کاربردهای مواد تازه گشود که از مرز الیاف سنتزی صرف، بسیار فراتر رفت.

کارهای نخستین کراتز روی بسپارش استری تمرکز یافت که از اثر اسید سوپریک subérique

CH<sub>2</sub>OH-CH<sub>2</sub>OH به دست می‌آمد. COOH-(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>-COOH acide بر اتیلن گلیکول CH<sub>2</sub>OH-CH<sub>2</sub>OH به دست می‌آمد. پس از اینکه دو سال در این راه تحقیق کرد، معلوم شد که این راه به نتایج دلخواه نمی‌انجامد. اما آقای ج. و. هیل<sup>۱</sup> دستیار کراتز به وی توجه داد که این فرآورده می‌تواند با گرم شدن، مانند نخ کشیده شود و پس از خنک شدن، این نخها را می‌توان باز کشید تا دارای بهترین کیفیت مکانیکی، استحکام و کشسانی شوند. این مشاهدات، بعدها به ساخت رده تازه‌ای از فرآورده‌های سنتزی منجر شدند. اما در آن زمان کراتز ترغیب شد، که به جای گلیکول از دی‌آمین استفاده، و تحقیق کند که نتایج زنجیری شدن آنها با دی‌اسیدها چه خواهند بود.

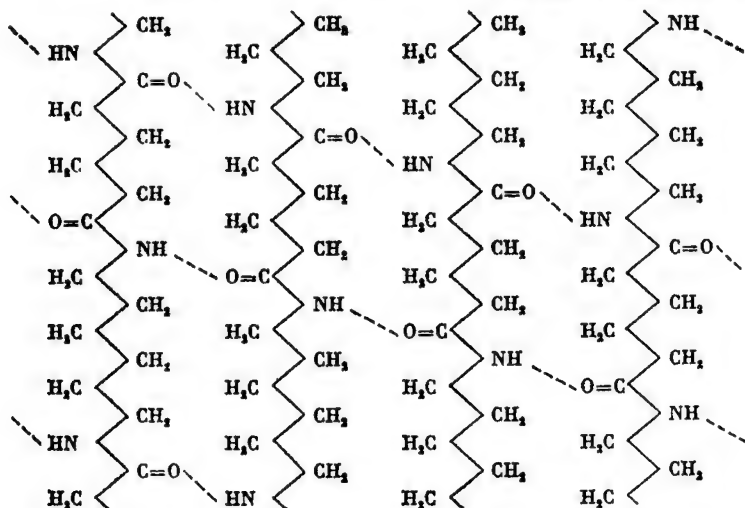
دیدیم که در ۱۹۳۱ آقایان کراتز و کالینز روی نئوپرن کار کردند و تنها در سال ۱۹۳۵، پس از بررسی شمار فراوانی از ترکیبات دو دسته اجسام بود که توانستند با تراکم اسید آدیپیک COOH-(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>-COOH و هگزامیلن دی‌آمین NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>-NH<sub>2</sub>، ماده‌ای تولید کنند که می‌توانست به نخ طولی تبدیل شود و همه خواص ابریشم را داشته باشد. در آلمان، در همین سالها، آقایان پاول شلاک<sup>۲</sup> که به حساب ی. گ. فاربن ایندوستری کار

می‌کرد ترکیب کاپرولاکتام را که آمیدی حلقوی از اسید آمینوکاپروئیک



است

بررسی کرد و راه باز کردن زنجیر و به دست آوردن پولی‌آمید خطی را یافت. امکان بسپارش اسید آمینوکاپروئیک در سال ۱۸۹۹ بوسیله زیگموند گابریل آلمانی و پس از وی در ۱۹۰۷ توسط آقای س. فون براون هموطن وی پیش‌بینی شده بود. اما در آن زمان کسی نمی‌اندیشید که از این راه یک ماده سنتزی نیروژندار به دست می‌آید و شیمی آن زمان، وسیله این کار را نداشت. خود کراتز از این راه تهیه آگاه بود اما به علت دشواریهای موجود در ساخت اسید مربوطه نیز چون این کار با اشکال باز کردن حلقه کاپرولاکتام، که در جریان گرم کردن ایجاد می‌شد مواجه بود و اتلاف قابل توجه آمینو اسید را در پی داشت، از اجرای آن صرف‌نظر کرد. آقای شلاک در کار خود خوشبخت‌تر بود. نخستین اختراعات ثبت شده کراتز که فاربن ایندوستری آنها را انتشار داد، با صرف وسایل بزرگی برای افزایش نتایج شیمیدان آن همراه بود و توانست در ۱۹۳۸، پرلون، نخستین نخ پولی‌آمیدی را معرفی کند.



ساختار شبکه‌ای نایلون با پیوندهای میان گروههای CO یک زنجیر و NH زنجیر مجاور، با فاصله ۴/۸ آنگسترم، ۱۹۴۸.

شرکت دوپون دنومور بنوبه خود کوشش چشمگیری برای صنعتی کردن روش کراترز به عمل آورد. تعداد ۲۳۰ شیمیدان آن، مدت سه سال در این راه کار کردند. این مؤسسه بزرگ امریکایی در سال ۱۹۳۸ کارخانه‌ای برای تولید آن برپا کرد و در سپتامبر ۱۹۳۹ نخستین جورابها و مسواکهای نایلونی را در روزنامه‌ها تبلیغ کرد. آقای کراترز در سال ۱۹۳۷ مرد. هزینه‌های ساخت این فرآورده به ۲۷ میلیون دلار بالغ شد، اما در یک سال ۶۴ میلیون جفت جوراب فروخته شد.

وقایع جهان به دنبال آن برای امریکاییها مساعد شد درحالی‌که ساخت این فرآورده در آلمان، طی سالهای طولانی متوقف بود. چندین مؤسسه بزرگ اروپا، بویژه تراست انگلیسی ایمپریال کیمیکال اینداستریز (ICI) که برای تولید نخهای نایلونی با شرکت کورتاد لیمیتد<sup>۱</sup> شریک شده بود از دوپون اجازه ساخت گرفت. در فرانسه، شیمیدانی با نام میشل ژنا<sup>۲</sup> که در شرکت پچینی کار می‌کرد و همکاران وی توانستند بر پایه اسید ریسینولئیک یک نوع نخ پولی‌آمیدی بسازند که با تحمل کراکینگ، اسید اون‌دسیلنی (C<sub>۱۰</sub>H<sub>۱۹</sub>·COOH undecylenique) می‌دهد که می‌تواند به آمینو اسید H<sub>۲</sub>N(CH<sub>۲</sub>)<sub>۱۰</sub>-COOH تبدیل شود. این جسم، همان ریلسان rilsan است که ساخت آن ده سال بعد شروع شد.

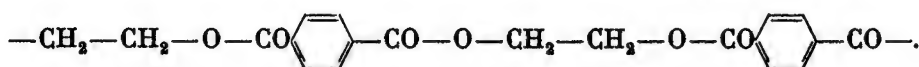
ساختار واقعی نایلون ۶۶ پس از اندک مدتی آشکار شد. نایلون را می‌توان به راههای گوناگون از ارزانترین مواد خام موجود در هر کشور تهیه کرد، بنابراین تهیه آن بسیار با صرفه است. کاربرد نایلون یا مواد دیگر پلی‌آمیدی، عملاً در همه رشته‌های فنی و زندگی جاری است.

گسترش پس از جنگ: سومین دوره تحول صنایع مواد سنتزی، که دوره کنونی است، از سالهای ۵۰ شروع می‌شود. ویژگی این دوره، افزایش برق‌آسای تولید این فراورده‌ها در همه کشورهای صنعتی، پیدایش خانواده‌های تازه بسپارها، و کاربرد مستقیم یک ماده خام اولیه است.

گسترش این تولید، نتیجه تلاش جنگی در تأسیس کارخانه‌های اولیه برای این فراورده‌های جدید بودند. موفقیت نایلون در میان مردم، پیش از آنکه ممالک متحده آمریکا به جنگ کشیده شود تأمین شده بود؛ اما نیازهای تازه بسیار بیشتر از نیازهای مصرفی زمان صلح بود. کاربردها چنان سرعت افزایش یافت که می‌توانستند این سالهای جنگی را بکلی نادیده بگیرند. برای همه این مواد، وضع چنین بود. صلح بازگشته بود و صنعت آمریکا که بسیار مجهز و آماده بود فراورده‌های خود را در همه جهان سرازیر کرد و هاله‌ای از افسانه آن را در میان گرفت. کشورهایی که متحمل بیشترین زیانها شده بودند همگی در فکر نوسازی ظرفیتهای صنعتی خود با رجحان دادن به تولید مواد سنتزی بودند. صنایع دیگر آنها نیز از همین کوششها برخوردار بود و جملگی، مصرفی شده بودند.

پولی‌استرها: پیدایش خانواده‌های تازه‌ای از بسپارهای بالا مربوط به بعد از جنگ نیستند؛ اما چون اوضاع کلی، پشتیبان آنها بود، گسترش تولید آنها، چنانچه جنگ هم پیش نمی‌آمد، بسیار سریعتر انجام می‌گرفت.

پولی‌استرها، یا درست‌تر، دسته‌هایی از پولی‌استرها، در نیمه دوم سالهای ۳۰ بخوبی بررسی شدند. امتیازات به ثبت رسیده اصلی، در سالهای ۴۴ تا ۵۰ بود و فراورده‌هایی از قبیل تریلن از ICI، در ۱۹۵۵، داکرون از دوپون در ۱۹۵۳ و فیلما یا الیاف دیگر با نامهای بازرگانی گوناگون روانه بازار شدند. آنها به‌طورکلی مشتقات یک دی اسید آلیلی، اسید تری‌فتالیک ترکیب شده با گلیکول هستند. شیمیدانها بدین ترتیب نوعی بسپارش را انجام دادند که بظاهر مثل بسپارش سازنده نایلون بود اما، نه از نوع پولی‌آمید:



فراورده‌هایی که از بسپارش ترفتالهای گلیکول به‌دست آمده‌اند خواصی مشابه پولی‌آمیدها دارند.

قابل توجه است که کارهای اولیه پژوهشی در آزمایشگاه یک شرکت کوچک، با هزینه‌های کم انجام گرفته بود: دو شیمیدان انگلیسی با نامهای ج. ر. وینفیلد<sup>۱</sup> و ج. ت. دیکسون با چند دستیار، اما هزینه گسترش و صنعتی کردن آن تنها برای انگلستان به بیست میلیون پوند بالغ شد.

بررسی این نوع تراکم طبعاً شامل همه امکانات کاربردی، پولی‌استرهای آلیفاتیک (خطی) بود که توسط کراترز، بیان و در سال ۱۹۴۲ بوسیله بایر «شبکه‌بندی» شده بودند، اما بویژه حدود سال ۱۹۵۰ با هم‌بسیار کردن آن با مشتقات اسید ایزوسیانیک  $H-N=C=O$  بود که بعدها راه به‌سوی پلی‌اورتانها باز شد. پولی‌استرهای اشباع نشده، که با ترکیبات وینیلی هم‌بسیار شدند، در همان دوران دسته‌های دیگری از رزینها را تهیه کردند.

پولی‌اورتانها: پولی‌اورتانها هم در همان زمان مورد تحقیق بایر قرار گرفتند. آنها در اصل مشتقات

اسید کربامیک  $O=C \begin{matrix} \nearrow NH_2 \\ \searrow OH \end{matrix}$  هستند که اوره، آمید آن است. اما بایر آنها را بروش تراکم استر

ایزوسیانیک  $O=C-N(CH_2)_6-N=C=O$  مشتق از هگزامتیلن دی‌آمین، که آقای کراترز در موارد دیگری آن را به‌کار برده است، با گلیکول به‌دست آورد. در این مورد هم ما در برابر یک خانواده بسیار پر ازدحامی قرار داریم که بر پایه آن در سال ۱۹۴۷ کپسارهای سنتزی گوناگونی ساخته شدند.

پولی‌اتیلنها: یکی از خانواده‌های پر بارآور بسیارها که در گذر سالهای ۵۰ افزایش یافته است، پولی‌اتیلنها می‌باشند. بررسی امکانات بسپارش اتیلن، در سالهای ۲۰ بدلیل اینکه آثاری روی واکنشهای شیمیایی با اعمال فشارهای زیاد داشته است و کاربرد آن در آن زمان با ساخت سنتزی آمونیاک اهمیت بسیار فراوان یافته بود، کار مستقلاً شده بود. ده سال بعد، پس از گذشت مراحل متعدد، پژوهش درباره رفتار اتیلن در فشارهای بالا با رهبری چند شیمیدان ICI (ایمپریال کیمیکال اینداستریز) انگلستان به پیش برده شد. در ۱۹۳۴ این گروه متعدد که زیر نظر آقایان ا. و. فاسیت<sup>۲</sup> و ر. ا. گیسون و م. و. پرن<sup>۳</sup> کار می‌کرد تصادفاً گرد سفیدی به‌دست آورد که بهترین کیفیت مورد انتظار از یک فرآورده سنتزی - کشش، قالب‌گیری، پایداری در برابر عوامل شیمیایی و عایق بودن - را داشت. این گرد، بسیار بالایی بود که از اتصال زنجیری مولکولهای اتیلن، که در این تراکم، پیوندهای دوگانه خود را از دست داده بودند:  $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$  ساخته شده بود. دو سر زنجیر ممکن بود برحسب روشی که برای ساخت به‌کار گرفته شده بود، ساختارهای مختلفی داشته باشند، و بر این اساس می‌توانستند زنجیرهای کوتاه یا بلند شاخه‌دار به‌دست آورند.

هرچند که امتیازات این انگلیسی‌ها در سال ۱۹۳۷ به ثبت رسید، اما ساخت صنعتی آنها پس از پایان جنگ آغاز شد. در اساس، نخستین روشی که به‌کار گرفته شد، تولید نخستین بسیار در فشار ۳۰۰ اتمسفر بود. بسیارش دوم در ۲۰۰ اتمسفر انجام می‌گرفت و مقدار کمی اکسیژن به‌عنوان کاتالیزور به‌کار برده شد؛ دمای کار در حدود ۲۵۰ درجه بود.

راه‌های دیگری یافت شدند که به فشار بالا نیاز نبود. آقای کارل تسیگلر که در انستیتوی ماکس پلانک مولهایم<sup>۱</sup> تحقیق می‌کرد توانست نخستین بسیارش را با تثبیت روی کلرور آلومینیم به‌عنوان پایان کار، در فشار پایین عملی کند. هنوز بسیارهای پایینی بودند که تنها از دو یا سه مولکول اتیلن تشکیل می‌شدند. چهار سال بعد وی توانست با گروه خود با همین روش، بسیارهای بالای اتیلن را بسازد و در ۱۹۵۴ با همکاری جولیانو<sup>۲</sup> ایتالیایی بسیارهای یک رده اتیلن، پروپیلن  $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2$  را که متبلور شد، بسازند. این ماده جدید، بسیار سخت و محکم بود.

در طی همین سالها، شیمیدانهای مؤسسه فیلیپس پترولئوم در ممالک متحده امریکا که از اکسیدهای کروم به‌عنوان کاتالیزور استفاده کردند توانستند اتیلن و اولفینهای دیگری را در فشار ۵۰ اتمسفر، بسیار سازند. فرآورده‌های به‌دست آمده، خصوصیتی بسیار مشابه فرآورده‌های تسیگلر داشتند. مؤسسات دیگر نفتی، نظیر استاندارد اوایل ایندیانا در سالهای ۱۹۵۵ - ۱۹۵۶ با بهره‌گیری از طبیعت کاتالیزورها (نیکل، کبالت، اکسیدهای تیتان و غیره) در فشار (۵۰ تا ۱۰۰ اتمسفر) و گرما، باز هم روشهای دیگری را به‌کار گرفتند.

در کار تولید پولی‌اتیلنها با تنها یک نوع ماده خام، اتیلن یا هم‌رده‌های بلافاصله بالاتر آن، توانستند با استفاده از واکنشهای پیش‌بینی شده و تغییر شرایط بسیارش، یک ردیف مواد جدید به‌دست آورند.

سیلیکونها: چندی نگذشت که شیمی سیلیسیم و ترکیبات آن با کمپلکسی فراوان به میدان آمدند و شباهتهایی با شیمی کربن از خود نشان داد. زمانی گمان می‌بردند که می‌توانند یک ترکیب آلی سیلیسی، نظیر  $\text{R}-\text{Si}-\text{O}$  را به یک کتون تشبیه کنند، اما این گمان بی‌درنگ کنار گذاشته شد. چندین شیمیدان سیلیکونها را بررسی کردند و توانستند ترکیبات ساده‌ای از آنها را توضیح دهند. بین سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۹۴۰، شیمی سیلیسیم به‌طور کامل در آزمایشگاه شناخته شد؛ توجه و تمرکز پژوهشهای همه این شیمیدانها به این موضوع، صرفاً برحسب تصادف و به ساقه کنجکاو بود و اتفاقاً بسیارهایی از ترکیبات سیلیسیمی آلی، به‌طور غیرمنتظره به‌دست آمدند.

۱. Mülheim: شهری در قسمت رور، در مغرب آلمان-م.



تحقیقات اولیه در سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۸۸۰ بوسیله آقایان شارل فریدل و جیمز میسن کرافتس، و نیز فریدل و آلبرت لادنبرگ<sup>۱</sup> انجام گرفت. اما آقای ف. س. کیپینگ<sup>۲</sup> امریکایی بود که با کار در این زمینه در سالهای ۱۸۸۹ تا ۱۹۱۴، هسته اساسی دانش ساخت سیلیکونها را به دست داد. آقای کیپینگ بویژه در ۱۹۰۴ از واکنش گرینیار برای اجرای نخستین سنتزهای سیلیسیمی

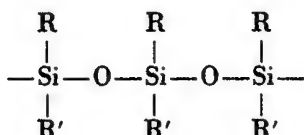
آلی استفاده کرد و آلکیل و آریل سیلوکسانها  $\begin{matrix} R \\ \diagup \\ Si \\ \diagdown \\ R \end{matrix} \begin{matrix} Cl \\ \diagup \\ \\ \diagdown \\ Cl \end{matrix}$  را به دست آورد که در هیدرولیز تولید

سیلانولهای مربوطه  $\begin{matrix} R \\ \diagup \\ Si \\ \diagdown \\ R \end{matrix} \begin{matrix} OH \\ \diagup \\ \\ \diagdown \\ OH \end{matrix}$  را می‌دهند. این ترکیبات، پایه سیلیکونها هستند. و با داشتن

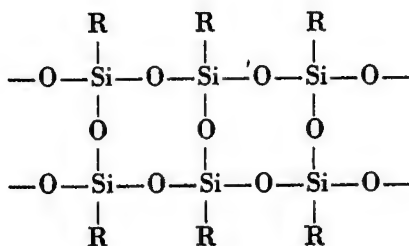
گروههای هیدروکسیل -OH در میعان، نخستین بسپار را می‌دهند.

در واقع این امکانات، فراوان هستند، زیرا R می‌تواند گروهی از ردیفهای خطی یا حلقوی باشد و می‌توان روی یک سیلیسیم، گروههای گوناگونی را وصل کرد، و نیز اگر یکی از آنها جای خود را به Cl بدهد، یک ترکیب پایه‌ای با سه -OH خواهیم داشت و بسپارش می‌تواند سه بعدی باشد. چنانچه میعان پلکانی (پولی‌کندانسانسیون) ترکیبی از نوع نخست، یک درشت‌مولکول خطی

بدهد، می‌توان آن را چنین نمایش داد:



و برای نوع دوم شبکه‌ای به شکل زیر می‌دهد



در واقع پیکربندی این درشت‌مولکولها، بسیار پیچیده هستند.

این جنبه از شیمی ترکیبات سیلیسیمی آلی، تنها در ۱۹۴۱ به‌طور مشروح روشن شد. آقای کیپینگ که به تحقیقات خود تقریباً تا این تاریخ ادامه می‌داد، به آن علاقه‌مند نشد، هدف وی مشخص کردن ترکیبات ساده بود و زمانی که بسپارهایی به شکل چسبهای مایع به دست آورد از تحقیق چگونگی و مشخصات آن منصرف شد. اما گرچه آقای کیپینگ غرق در یک پژوهش اساسی

پربازده بود، جالب توجه است که هیچ‌یک از شیمیدانهای دیگری که به‌سوی تحقیق صنعتی روی آورده بودند کوششی برای پر کردن این جای خالی نکردند، آن هم در زمانی که تهیه مواد سنتزی، آنچنانکه در گذشته شرح داده شد، گسترش زیاد یافته بود. در واقع، مواد خام مورد استفاده، از ترکیبات کربنی متعلق به شیمی آلی محض بودند و مشتقات سیلیسیم هنوز گویا آماده تبدیلاتی از این ردیف نبودند. وانگهی، روشهای تحقیق درشت‌مولکولها، به تازگی و پس از کارهای شتاودینگر و کراتز، بدرستی به‌کار گرفته می‌شد.

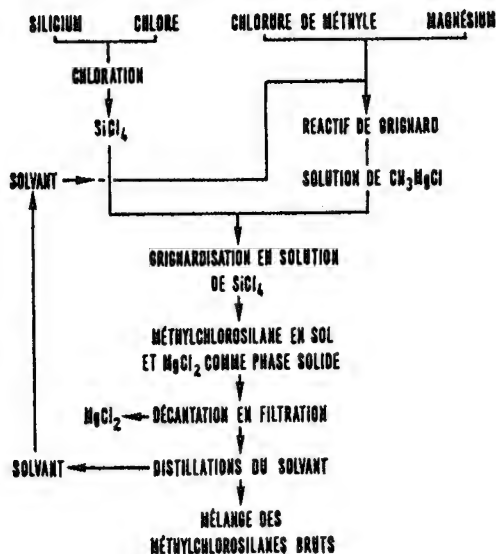
سرانجام بخاطر نیازهای صنعتی بسیار مشخصی، توجه به خواص در همجوشهای آلی سیلیسی شروع شد. شیشه‌گران و برقکاران به این نهضت تحقیق دودستی چسبیدند، نهضتی که تنها در آزمایشگاههای بسیار مجهز مؤسسات بزرگ می‌توانست به پیش رود. شروع کار، از ممالک متحده آمریکا و در اواخر سالهای ۳۰ بود. مؤسسه امریکایی کورنینگ گلاوس ورکزیکی از شیمیدانها خود، آقای ج. ف. هاید<sup>۱</sup> را مأمور تحقیق آن چیزی کرد که عادتاً به آن سیلیکون می‌گفتند تا اینکه بتواند از شفافیت آن برای ساخت جسمی محکمتر از شیشه‌های آلی، با آمیختن آن با شیشه‌های معدنی استفاده کند. همچنین در نظر بود از خواص دی‌الکتریکی جالب توجه و نیز خاصیت آن در چسبندگی، برای تهیه مواد عایق از نوع سیمهای شیشه‌ای، استفاده شود.

نتایج نخستین کارهای هاید، مورد توجه شرکت جنرال الکتریک قرار گرفت. این شرکت نیز بنوبه خود، گروهی را زیر نظر آقایان و. ا. پاتود<sup>۲</sup> و ا. گ. روخو<sup>۳</sup> مأمور این تحقیق کرد. در سال ۱۹۴۱ روشی برای سنتز مستقیم سیلیکونها به توسط روخو یافت شد. در این روش سیلیسیم را مورد فعل و انفعال یک مشتق کلردار آلی در مجاورت مس قرار می‌دهند. مس در اینجا نقش کاتالیزور را دارد و کاربرد صنعتی آن آسانتر از استفاده از واکنش گرینیار است. باین‌حال، روش استفاده از واکنش گرینیار باقی ماند.

در طی چند سال، نه تنها روشهای ساخت پیچیده‌ای به‌کار گرفته شدند و انواعی از سیلیکونها تهیه شدند، بلکه تحقیق منسجم مشخصات آنها نشان داد که با خانواده‌ای از فراورده‌ها سروکار داریم که امکانات کاربرد آنها بسیار گسترده‌تر از کاربرد هر خانواده بزرگ دیگری است که شیمی صنعتی تا کنون آن را شناخته است.

گوناگونی بی‌نهایت پیکربندی و روابط بین گروه‌بندهای آلی / سیلیسیم در این درشت‌مولکولها، نوعی حالت‌های فیزیکی بدانها داده است که در روغنهای مایع دارای لزوجت، تا حالت کائوجویی و بالاخره جامد دیده می‌شوند. جالب‌ترین خواص فیزیکوشیمیایی آنها قدرت عایق برق و گرما

جدول ۴. ردیف واکنشها برای تهیه سیلیکونها.



بودن آنها، پایداری آنها در برابر آثار جوی و شیمیایی، آبگریزی، ناپسبناکی و بالاخره پایداری آنها در برابر گرماست. آنها را بر اساس ساختمان و حالت فیزیکی، برای کاربردهای حساس در ساخت مواد جنگی، از هر نوع: عایق، ولکانش پذیر، روانساز (یا رونواز)، ضد رطوبت و غیره برگزیدند. این همان چیزی است که تکنسین‌های امریکایی با علاقه آن را کشف کردند و به مجرد ورود امریکا به جنگ، این فراورده‌ها، که برای ساخت آنها مدت‌ها و بی‌هدف حدود نیم سده تحقیق می‌کردند، یک‌باره در راه تولید صنعتی آن گام نهادند.

شرکتهای جنرال الکتریک، کورنینگ گلاس ورکز که در دوره پایانی و تحقیقات تب‌آلود با یکدیگر شریک شده بودند یکی از بزرگترین مؤسسه شیمیایی امریکا را با نام داوکیکال کمپانی Dow Chemical Co تشکیل دادند و در سال ۱۹۴۲ شعبه مشترکی را با نام داوکورنینگ کورپریشن Dow Corning Corporation تأسیس کردند تا نخستین تولید انبوه آن را تأمین کنند. در ۱۹۴۶ شرکت جنرال الکتریک با هزینه خود به ساخت سیلیکونها دست زد، و در انگلستان نیز ICI و میدلند سیلیکانز Midland Silicones همین کار را کردند. پس از آن، طی ده سال،

تولید سیلیکونها در همه کشورهای صنعتی جهان رایج شد.

زمینه کاربرد مواد سنتزی: سرانجام، طی این دوره سوم توسعه صنعت مواد سنتزی، تحول دیگری پیش آمد. این تحول مربوط به منابع فراورده‌های پایه‌ای اکثریت بزرگ مواد بود. پیش از آغاز جنگ جهانی دوم در چند سال پس از پایان آن، نقطه آغاز همانا ترکیب بسیار ساده موجود، استیلن، بود که در گذشته دیدیم که تولید آن چگونه به مرحله صنعتی رسید. اما اتیلن را نمی‌توان ندیده گرفت، گرچه قابل مقایسه با استیلن نبود. بتدریج که تکنیکهای صنعت نفت در سالهای ۵۰ تحول می‌یافتند، این منابع فراوانتر می‌شدند. سرانجام استیلن جای خود را، به عنوان فراورده پایه‌ای این صنعت بزرگ سنتزی به اتیلن واگذاشت. کمی بعد خواهیم دید که این تحول چگونه انجام گرفت. صنعت شیمی با گرایش از مواد خام مصنوعی به مواد سنتزی، بتدریج و بعد با جهشهایی در طی دوده اخیر، سلطه خود را بر همه صنایع و نیز تأثیر خود را بر همه جنبه‌های زندگی روزمره، گسترده ساخت.

در آغاز، این مواد جدید را به چشم فراورده‌های جانشین مواد سنتی می‌نگریستند. مواد سنتی در موقعیتهایی اقتصادی یا سیاسی ممکن بود کمیاب یا گران شوند، یا اینکه کیفیت آنها برای پاسخ‌گویی به نیازهای بیان شده، گرچه تا کنون رضایتبخش بوده‌اند، نسبت به مواد جانشینی در مرحله پایسنتری قرار می‌گیرند. این مطلب در مورد باکلیت صادق بود، زیرا رزینهای قالبگیری شده یا صفحات آن، خواص دی‌الکتریکی یا مکانیکی بسیار جالبی داشتند که مواد سنتی فاقد آن بودند، و انگهی هزینه تولید و راه‌اندازی آن هم کمتر بود. اما این جنبه را می‌توان در موارد بسیاری نادیده انگاشت. مدتهای زیاد الیاف ریون از ابریشم گرانتر بود، اما منظره بسیار موج و دلپذیری داشت و دیدیم که کاتوجوی سنتزی اولیه، اغواکننده بود.

با این حال، پس از گذشت سه دهه نخست از سده کنونی، معیار دآوری تغییر یافت. موادی که صنعت شیمی آنها را بهتر کرده‌اند. بیشتر به مواد تکمیلی تبدیل شده‌اند تا مواد جانشینی. بعضی از آنها طبعاً مواد طبیعی را لااقل در زمینه‌های بسیار مشخصی حذف کرده‌اند. کاربرد گوناپرکا در ساخت عایقهای برق، در اواخر سالهای ۲۰ کنار گذاشته شد. کشتارهای سنتزی را با کاتوجوی طبیعی، برای بهتر کردن خواص آن، می‌آمیزند و چنین مخلوطهایی در جاهایی که صمغهای طبیعی از عهده وظایف محوله بر نمی‌آیند به‌کار گرفته می‌شوند. برای استحکام تایرهای اتومبیلها و کامیونها، نخهای سنتزی به جای پنبه‌ای به‌کار گرفته شدند و ...

اگر رزینهای کلرور پولی‌وینیل برای جانشین صمغ لاک، در ساخت و نیز پرسکاری

صفحات بسیار کوچک با شیرهای بسیار نزدیک هم، در آن زمان موجود نبود تولید صفحات پردوام گرامافون بوسیله پترگلدمارک<sup>۱</sup> در سالهای ۱۹۴۵ - ۱۹۴۸ برای شعبه‌ای از Colombia Broadcasting System بدین خوبی انجام نمی‌گرفت. طبعاً پیشرفت در ضبط صدا و نیز پژوهش در ساخت بازویی بسیار سبک برای نگاهداری سوزن، مستلزم تکنیکهای دیگری بود که بسیاری از آنها از فراورده‌های صنایع شیمیایی کمک گرفته‌اند.

ما بر سر آن نیستیم که مراحل تحولی تکنیکهای گوناگون کاربردی را، تنها تحت تأثیر تهیه کردن مواد مصنوعی و سنتزی در زمینه آنها بدانیم. پس از فن عکسبرداری که بی‌شبه نخستین زمینه کاربرد این مواد است، صنایع برق نیز یکی از اولین و مهمترین استفاده‌کنندگان از این مواد بوده است و بعدها، بلافاصله پس از پایان جنگ جهانی اول، ساخت هواپیماها و اتومبیلها، تکنیکهای بسته‌بندی و تزئین، اپتیک عمومی و اپتیک دقیق، مکانیک، تجهیزات شیمیایی، وسایل اتاق جراحی، پیایی و حتی گاهی در یک زمان، دهه به دهه از گروههای کاربردهای پیوسته جدید بوده‌اند.

دستاوردها در نساجی: در این باره شمارش صرف این دستاوردها کافی نیست. بهتر است دستاوردهایی را هم که در زمینه الیاف بافندگی بوده‌اند بیدرنگ به حساب آوریم. شمار زیادی از موادی که با کارهای شیمیایی بهتر شده‌اند می‌توانند در اثر گرم کردن، محلول یا ذوب شوند و از سوراخهای نخریز مدرجی بگذرند و به نخ تبدیل شوند. طبعاً تکنیکهای گوناگون کاری، پس از پیدایش نخستین الیاف سلولوزی برای انجام ریسندگی، کشش، شست‌وشو و غیره، بمنظور تهیه انواع فراورده‌های مطلوب، پدید آمدند. وانگهی ساخت مواد تازه از راه هم‌پسار بمنظور افزایش گوناگونی انواع بسپارهای رایج، آغاز شد.

در کار ساخت بعضی الیاف طبیعی، مانند پنبه و کتان توانستند مثلاً در سایه اختراع روش چروک‌ناپذیرسازی - که دستاورد پژوهش دراز مدتی بود که از سال ۱۹۱۸ تا ۱۹۳۲ با سماجت به‌وسیله گروه کوچکی از پژوهندگان، در استخدام شرکت انگلیسی Tootal Broadhurst Lee با مدیریت آقای سر کنت لی<sup>۲</sup>، پیگیری شد - موفقیتهایی در بهتر شدن کیفیت آنها پدید آورد. این روش صنعتی شده، شامل آغشته کردن نخها با موادی است که در جریان نوعی عملیات حرارتی، تشکیل رزینی روی خود نخ می‌دهند. علاوه بر نخ طبیعی، نخ مصنوعی یا سنتزی نیز می‌تواند از این روش بهره‌گیرد.

این نخها باید کوتاه باشند که از دستگاه ریسندگی مانند نخهای طبیعی بگذرند. نخستین هدف همه پژوهندگان ساخت نخهای شیمیایی، به‌دست آوردن نخ طویل با گذراندن مایع دارای لزوجت

از دستگاه نخ‌ریز بود. اما در آن زمان که هنوز تنها نخهای سلولوزی را می‌شناختند، مقداری نخهای ردّی باقی می‌ماند که بزودی اندیشیدند که با رسیدن آنها با وسایل ریسندگی معمولی، آنها را مورد استفاده قرار دهند. سپس طی جنگ جهانی اول، برای جبران کمبود الیاف طبیعی، بویژه پشمی، کاربرد الیاف کوتاه شیمیایی را که با قیچی کردن الیاف بلند به دست آمده بودند، سیستماتیک کردند. نخستین امتیازهای به ثبت رسیده، تاریخهای ۱۹۱۱ و ۱۹۱۳ را دارند؛ اما در سالهای ۲۰ بود که خامه سلولوزی به مقدار فراوان وارد بازار شد. این قیچی کردن نخها به الیاف کوتاه و عمل آوردن آنها، در همه فرآورده‌هایی که بعداً ساخته شدند تکرار شد.

بدین ترتیب، صنعت نساجی سرعت هم از لحاظ تعداد و هم از جنبه گوناگونی مواد خام، گسترش یافت و علاوه بر آن، مخلوط نخهای طبیعی و غیرطبیعی به این صنعت امکان داد که هرگونه کیفیت مطلوب مکانیکی و بافندگی نخهای ریسیده، تقریباً به‌طور کامل، به دست آید. الیاف طبیعی، که هرگز از دور خارج نشدند، مقام خود را در صنعت پوشاک، مثلاً برای رفع نیازهای مربوط به کیفیت پارچه‌ها حفظ کردند. با کاربرد نسبتی از الیاف شیمیایی، کیفیت آنها بهتر می‌شد. پس از جنگ جهانی دوم بود که کاربرد تار بریده staple سرعت تعمیم یافت.

نابافته‌ها: در این زمان فرآورده‌ای از نوع دیگر، «نابافته» به بازار آمد و کاربرد آن، در طی سالهای ۵۰ در ممالک متحده آمریکا و در دهه‌های بعدی در قاره‌های دیگر، گسترش یافت. در اینجا هم در برابر ما امکانات فنی بسیار زیادی قرار دارند. این امکانات، نخست مربوط به طبیعت الیاف کار شده، نه تنها طبیعت شیمیایی، بلکه ابعاد آنها می‌باشند: الیاف کوتاه به طول سه میلیمتر یا تار بریده که چهار تا شش سانتیمتر طول دارند. باز این امکانات مربوط به ترتیب الیاف، پس از پراکندگی آنها، یعنی وضع فتیله است. پژوهش در این زمینه، بویژه روی این مسایل و نیز روی وسایل فیزیکی مربوط به فتیله سازی، گردش هوا یا جریان آب، تمرکز داشت.

تکنسین‌ها به سائقه کنبجکاوای در تحول، خواستند فتیله را با رشته‌های پیوسته انجام دهند که خود ساختار فتیله می‌توانست به دل خواه، تحت تأثیر بعضی عوامل فیزیکی در زمان ریسندگی، آماده شود. در واقع، در اینجا ما به پایان یک خط طویل پژوهش رسیده‌ایم که ریشه‌های آن به آغاز سده برمی‌گردد - خطی که در جریان دهه‌های پس از جنگ دوم به کار بردهای صنعتی منجر شدند. تهیه الیاف، مثلاً تارچه‌ای، که با روزرانی جرم مذاب یا محلول، طبق روشی که آقای کراتز در ۱۹۳۸ مطرح کرده است، برای ساختن فتیله‌های نابافته گسترش یافت. کاربرد چسبهای شیمیایی، افزایش الیاف ترموپلاستیک (گرمانرم) یا عمل آوردن مکانیکی بمنظور تأمین استحکام فتیله‌ها نیز

باید پیایی رواج گرفته باشند.

سرانجام، روشهای ساخت چنان گوناگون شدند که نابافته‌ها در ساخت ماهوت، چرمهای مصنوعی، پارچه‌های پوشاکی (آسترها و فراورده‌های ذوب چسبنده با اطو)، قواره‌هایی برای صافی در صنعت، کاغذهای سنتزی، فراورده‌های بسته‌بندی و غیره به‌کار گرفته شدند.

این چند عمل کلی مربوط به تحول صنعت نساجی تحت تأثیر نفوذ مواد شیمیایی را کارهای کوچک دیگری در تحول این مواد، تکمیل کرده‌اند. نظر این بود که این مواد شناخته شده را در کارالیاف تازه یا اختلاط تازه‌ای از الیاف به‌کار گیرند. بدین ترتیب ناچار از ایجاد مواد جدیدی برای اجرای کارهای تازه، تهیه فیتله‌های منظم از طریق روزنرانی و غیره بودند. چنانچه این مجموعه وسایل و امکانات را در همه زمینه‌های صنعتی، که مواد مصنوعی و سنتزی در آنها راه یافته‌اند وارد کنیم، می‌توان تصویری از مقدار تأثیر صنعت شیمی معاصر در تحول همه روشهای تولید صنعتی به‌دست آورد.

### مهندسی شیمی

تغییر شکل ساختار صنعت شیمی کلاسیک، چنانکه در دهه نخست این سده بود، به ساختار مهندسی شیمی، بتدریج و متناسب با پیشرفت رشته‌های تازه‌ای انجام گرفت که پیدایش و تکامل آنها را دیدیم. اما بخش دیگری از صنعت شیمی نیز در این تغییر شکل سهیم بود، و آن شیمی صنعت نفت است که معمولاً و بنادرست آن را پتروشیمی (= شیمی سنگ) می‌خوانند، درحالی‌که باید پترولوشیمی گفت.

پژوهش درباره هیدروژندهی: این پژوهش دقیقاً با آغاز این سده شروع شد. نخستین مراحل آن را با تاریخ نخستین تقطیر صنعتی نفت (صفحات ۶۴۰ تا ۶۴۲) دیدیم. آنچه که در اینجا باید تأکید کنیم مسأله شعبات پژوهشهای آزمایشگاهی درباره هیدروکربنهاست که زمانی پدید آمد که شروع به استفاده از هیدروکربنها به‌عنوان سوخت در موتورهای احتراقی شد. اما در تحقق این روش مهم عوامل دیگری هم مؤثر بودند که اولین آنها پراتیک سنتز صنعتی آمونیاک بر پایه نیتروژن و هیدروژن بود. این کار در واقع بخش بزرگش بر پایه واکنشهای هیدروژندهی بود که نخست، تکنیکهای مهم این صنعت تازه را پی‌ریزی کردند: هیدروژندهی به اکسید کربن، هیدروژندهی زغال‌سنگ در اول و سپس هیدروژندهی هیدروکربنها، بعداً. اما بعدها در پایان سالهای ۳۰، واکنشهای هیدروژن‌زدایی بود که برای تهیه مواد خام این صنعت بزرگ، اهمیتی خاص یافت.

گاه‌شماری تحولات صنعت شیمی در این زمینه طی نیم سده ۱۹۱۰ - ۱۹۶۰، کار بسیار

دشواری است. صنعتی که یکی از بخشهای بسیار مهم اقتصاد سراسر جهان را تشکیل می‌دهد. شاید پایهٔ این جنبش بزرگ را بتوان بر پژوهشهای آزمایشگاهی قرار داد، که به‌نظر نمی‌رسد کاربردهای صنعتی یافته باشند. یکی از کهنترین آنها جزء کارهای برتلو دربارهٔ سنتزهای بنیانی ترکیبات آلی بوده است: استیلن، الکل اتیلیک، اسید استیک و غیره. آقایان پل و آرنو (پسر و نوهٔ آقای تنار شیمیدان)، نخستین کسانی بودند که در سال ۱۸۷۳ با قرار دادن مخلوطی از هیدروژن و اکسید کربن تحت تأثیر تخلیه‌های برقی، یک مایع روغنی به‌دست آوردند. سی سال بعد آقایان پل ساباتیو و ژان باتیست ساندرن<sup>۱</sup> برای نخستین بار، هیدروندهی کاتالیزوری اکسید کربن و انیدرید کربنیک و نیز تبدیل آنها به متان را عملی کردند. کاتالیزورگر این عمل، نیکل و دمای کار حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه بود.

امتیازهای متعددی در سالهای بعد در مورد ساخت متان از طرف ساباتیو و ساندرن در سال ۱۹۰۵ و نیز از سوی شیمیدانهای انگلیس و آلمان به ثبت رسیدند، اما هرگز مورد استفاده قرار نگرفتند. مانع اصلی این کار، دشواری خالص کردن گاز آب بود.

در طی این دهه‌ها، ترکیب نقشهای حوضه‌های مختلف رفته رفته بخوبی شناخته شد، اما باز هم دربارهٔ نوع و درصد هیدروکربنهای آن شک و تردیدهایی باقی ماند، بدون آنکه از سازهای دیگری که در این مخلوط بسیار متنوع وجود دارند سخن بگوئیم. وانگهی، کوشیدند تا از راههای تجربی، هیدروکربنهای با وزن مولکولی زیاد را از نو بسازند - کاری که تنها برای اثبات یا رد نظراتی دربارهٔ پیدایش نفت انجام می‌گرفت.

ساباتیو و ساندرن با گسترش هیدروندهی به استیلن و استفاده از نیکل به‌عنوان کاتالیزور در سال ۱۹۰۵ یک ردیف هیدروکربنها را تا حد فراورده‌های مایع و نیز فراورده‌های تراکم استیلن به کربورهای آروماتیک به‌دست آوردند - کاری که در آن زمان سنتز نفت خوانده می‌شد. آقای ولادیمیر ن. ایپاتیف شیمیدان روس که در شیکاگو کار می‌کرد، بنوبهٔ خود «سنتز» نفت را با بسپارش اتیلن در دماهای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه، بدون کاربرد کاتالیزور، در سال پس از آن عملی کرد. ایپاتیف در این زمان به‌مناسبت اینکه در سالهای ۱۸۹۲ - ۱۸۹۶ روشی برای سنتز ایزوپرن (کربور اشباع نشده‌ای که در آن زمان می‌دانستند که ترکیب اساسی کائوچو می‌باشد) پیشنهاد کرد مشهور شده بود.

پژوهشهای دیگر وی در مجاورت کاتالیزور و در فشار انجام گرفته بودند. وی از فشارهای ۵۰۰ اتمسفر و بیشتر استفاده می‌کرد. در این دوره چنین روشهایی، با بدبینی تلقی می‌شد و بویژه ساباتیو بدانها اعتقاد نداشت زیرا از «هیپرپرسیون» برای سنتز آمونیاک استفاده شده بود. آقای



ایپاتیف همچنین از نخستین شیمیدانانی بود که کاتالیزور هتروژن و فعالیت کاتالیزوری شمار زیادی از ترکیبات معدنی مخصوصاً اکسیدهای فلزی را بررسی کرده بود.

او در جریان کارهای خود یک ردیف تمام از هیدروکربنها را به دست آورد. سپس به کار بسپارش گازهای کراکینگ روی آورد. یکی از کاتالیزورهای مورد استفاده وی، اسید فسفریک بود که بعداً در سال ۱۹۲۷ در آلمان برای همین منظور به کار گرفته شد.

از مشخصات سالهای پیش از جنگ جهانی اول، انجام پژوهشهای مربوط به گسترش روشهای هیدروژندهی جهت سنتز آمونیاک با مواد دیگری جز نیتروژن بویژه با زغال سنگ، لینیت، روغنها و قطران است. آقای فریدریش برگیوس<sup>۱</sup>، شیمیدان آلمانی، نظریه این روش را بیان داشت و در ۱۹۱۳ نخستین امتیازها را به نام خود به ثبت داد. تهیه هیدروکربنها با این روش، نتیجه کارهایی است که برگیوس مدت چند سال برای تعیین منشأ زغال سنگ و نفت انجام داده بود. اما روشهایی که وی به ثبت رسانیده بود تا سالهای ۱۹۲۴ - ۱۹۲۶، یعنی زمانی که آقای پیر<sup>۲</sup> مولیبدن و تنگستن را به عنوان کاتالیزور به کار گرفت و جریان عملیات به یک فاز مایع و سپس فاز بخار تقسیم شد، نمی توانستند در صنعت به کار روند. برگیوس در ۱۹۲۵ حقوق همه امتیازات خود را به BASF فروخت.

در سال ۱۹۱۳، باز هم BASF، اختراعاتی را برای هیدروژندهی به اکسید کربن به ثبت رسانید، در این زمان، امکان تهیه شمار زیادی ترکیبهای شیمیایی از آن را پیش بینی می کردند و بزرگترین دشواری کار این بود که نمی دانستند که آیا امکان هدایت مناسب واکنش برای تهیه فرآورده های معین و پرهیز از تشکیل مخلوطهای هیدروکربن و ترکیبات اکسیژنداری که جدا کردن آنها در محدوده اقتصادی غیرممکن است، وجود دارد یا خیر؟

دوران مخاصمات و سالهای بلافاصله پس از جنگ، کاربرد آنچه را که وجودش لازم می نمود به عقب انداخت. دیده شد که کوششهای شیمیدانهای آلمان، متوجه راه اندازی ساخت آمونیاک سنتزی و اسید نیتریک شد. پژوهشهایی که به تازگی راه به جایی برده بودند در سال ۱۹۲۲ با کوشش بیشتر به پیش کشیده شدند و میدان کاربرد آنها در بیست سال بعد چنان گسترده شد که در یک زمان در جهات مختلف توسعه یافت.

روش سنتز: از میان فرآورده های هیدروژندهی به اکسید کربن، یکی هم متانول،  $\text{CH}_3\text{OH}$ ، ساده ترین همه الکلهاست. تا آن زمان این الکل را از تقطیر چوب در ظروف در بسته به دست می آوردند، و ماده خام مهمی برای صنعت شیمیایی به شمار می رفت. ردیفی از اختراعات BASF

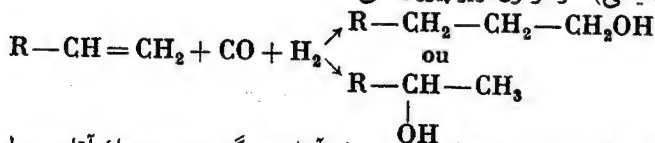
که در ۱۹۲۳ و ۱۹۲۴ به ثبت رسیدند شامل ساخت سنتزی متانول بر پایه گاز آب که در فشار انجام شده است و کاربرد همه کاتالیزورهای ممکن در دماهای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه بود. در گروههای زیادی که برای ساخت این ماده کار می کردند، آقای الوین میتاش هم بود که در عملی کردن سنتزهای نیتروژن شرکت کرده بود. این مؤسسه آلمانی در سایه تجربیاتی که به دست آورده بود توانست تولید متانول خالص را تقریباً بیدرنگ شروع کند. در برهه بین دو جنگ جهانی در آلمان برای برپا کردن چندین واحد تولید این ترکیب، کوشش خاصی به عمل آمد. کارخانه هایی که فعلاً در آلمان غربی قرار دارند ۱۸۰۰۰ تن متانول در ۱۹۲۸ و ۱۲۸۰۰۰ تن در ۱۹۴۴ تولید داشتند. در فرانسه، نخستین تولید متانول سنتزی، کمی پس از آلمان، در کارخانه شرکت کولمن واقع در بتون<sup>۱</sup>، بر پایه کارهای ژ. پاتار عملی شد که بویژه اثر اکسید روی و مس را به عنوان کاتالیزور تحقیق کرده بود. حلال صنعتی، ضدیخ، مضاف به سوختها و پروپرگولها، نقطه آغازی برای تهیه آلدهید فورمیک، اسید استیک، کلورو استات متیل، متانول، پایه شمار مهمی از ساختهای بزرگ است.

در زمانی که سنتز متانول توسعه می یافت، درصدد برآمدن تا از همین اصول برای ساخت فراورده های بالاتر استفاده کنند، اما تنها نتایجی که برای صنعت داشت، مواد مربوط به ساخت الکل

ایزوبوتیلیک بود. 
$$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \text{CH}_3 \end{array} > \text{CH}-\text{CH}_2\text{OH}$$
 امتیازهای اولیه در سال ۱۹۲۳ بوسیله BASF

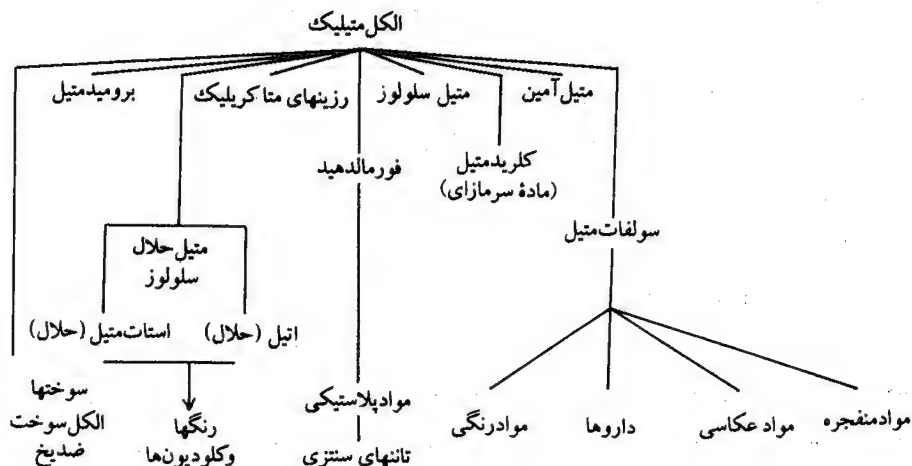
به ثبت رسیدند. این الکل، مصرف صنعتی فراوان داشت؛ اما برای آلمان، سود آن در امکان تبدیل به ایزوبوتیلن جهت ساخت کاوچوی سنتزی بود.

وانگهی این روش ساخت الکل ایزوبوتیلیک، سودمندی خود را طی سالهای پنجاه از دست داده بود، درحالی که روش تهیه الکلهای ردیف بالا، در نتیجه تأثیر اکسید کربن و هیدروژن بر اولفینها (کربورهای دارای پیوند اتیلنی)، از فرمول زیر پیروی می کند:



این نوع واکنش به اصطلاح اوکسو oxo کمی پیش از آغاز جنگ دوم بوسیله آقای رولن<sup>۲</sup> شیمیدان آلمانی برای یکی از مؤسسات مبتکر در سنتز متانول، Ruhrchemie AG بررسی شده بود. این روش در جریان جنگ برای تولید الکلهای چرب به منظور ساخت مواد پاک ساز، تکمیل شد. اما شرایط اقتصادی پس از جنگ امکان کاربرد آن را در آلمان نداد و حال آنکه ممالک متحده آمریکا و انگلستان که کربورهای اتیلنی را بسیار آسان به دست می آوردند، آن را

## جدول ۵. کاربردهای الکل متیلیک در صنعت الکل متیلیک



عملی ساختند. بدین علت بود که الکل‌های بالا و مشتقات آنها، که تا آن زمان نسبتاً کمیاب بودند، به فراوانی روانه بازار شدند.

این نمونه نشان می‌دهد که تکنیک‌های شیمی صنعتی پس از جنگ جهانی دوم، تا چه اندازه در تحول انعطاف یافته بودند.

سنتز فیشر-تروپش: آقای میتاش که در سنتز آمونیاک، نقش داشته است، کمی بعد به اتفاق آقای شنایدر با تحت تأثیر قرار دادن گاز آب به کاتالیزورهایی که از اوسمیم و کبالت ساخته شده بودند، همراه با فشار و گرما، هیدروکربنهایی با کربن بالا، تهیه کرد. این دستاورد، پس از سنتز کردن متانول با همکاری آقایان پیر و ک. وینکلر بود. در همین زمان آقای فرانتس فیشر که او نیز به این پژوهش دلبسته بود، تهیه هیدروکربنها را ادامه داد. وی همراه با همکارش تروپش در ۱۹۲۱ در انستیتوی کایزر ویلهلم (بعدها به انستیتوی ماکس پلانک تغییر نام داد) واقع در مولهایم نخست سینتول را ساخت.

فراورده‌ای که با این نام ساخته شد، آمیزه‌ای از ترکیبات اکسیژندار و هم‌رده‌های آلیفاتیک، اسیدها، الکلها، ستونها، آلدئیدها بود. واکنش مخلوط اکسید کربن هیدروژن در دمای ۴۰۰ درجه و

۱۰۰ اتمسفر فشار در مجاورت کاتالیزور انجام می‌گرفت. synthol که باز هم در فشار گرم می‌شد به synthin آمیزه هیدروکربنهایی که بی‌درنگ به‌عنوان سوخت به‌کار گرفته شد، تبدیل شد. فیشر و تروپش به مدت چند سال بررسی این تبدیلات را ادامه دادند. آنها ثابت کردند که چنانچه فشار واکنش را پایین آوریم درصد هیدروکربنهای تشکیل شده در برابر درصد ترکیبات اکسیژندار بالا می‌رود،

سرانجام در ۱۹۲۵ که کاتالیز خود را تکمیل کرده بودند توانستند سنتز هیدروکربنهای بالا را در دمای نسبتاً پایین ۲۰۰ - ۲۵۰ و فشار اتمسفر، انجام دهند. اما برای اینکه به راه‌اندازی روش فیشر - تروپش و تهیه طرح واحدهای تولید آن اطمینان حاصل شود لازم بود که حدود ده سال دیگر بگذرد. نخستین واحد تولید آنها در آوریل ۱۹۳۶ راه افتاد و پیش از پایان همین سال سه واحد دیگر آماده شدند و با یک ضربه، ظرفیت تولید اولیه نفت سنتزی به ۲۰۰۰۰۰ تن در سال رسید. این کوششها هم برای اصلاح روشها و هم بمنظور افزودن تجهیزات با سرسختی پیگیری شد. خود این روش پیوسته متحول می‌شد. در ۱۹۴۴ پس از یک مبادله اطلاعات بین کارخانه‌های آلمان، توانستند این واکنش را در فشاری متوسط و در مجاورت کاتالیزور «آهن» (چون کبالت بسیار کمیاب شده بود) انجام دهند. تعداد این کارخانه‌ها به رقم نه رسید و ظرفیت تولید آنها، چنانچه شش کارخانه در اثر خرابی، تعطیل نمی‌شدند، در سال به ۷۴۰۰۰۰ تن بالغ می‌شد. تولید واقعی آنها در ۱۹۴۲ برابر ۵۵۲۰۰۰ تن بود که در ۱۹۴۴ به کمتر از ۲۷۹۰۰۰ تن رسید.

دیده می‌شود که سنتز متانول و سنتز هیدروکربنها بر اساس گاز آب، که مخلوطی از اکسید کربن و هیدروژن است، لااقل در اصول به یکدیگر نزدیک هستند. ممالک متحده آمریکا کمی پیش از سال ۱۹۳۰ به سنتز متانول علاقه‌مند شد و پس از جنگ جهانی دوم بروش گاز آب نخستین کارخانه در ۱۹۴۹ گشایش یافت. کشورهای دیگر کمی پیش از این مملکت، به هر دو سنتز روی آورده بودند.

هدف سنتز نخست که تهیه سوختهای سنتزی بود بعدها اولویت خود را از دست داد؛ اما سنتز فیشر - تروپش با اصلاحاتی که در آن شد بر تحول صنعت شیمی اثر مهمی گذاشت: این سنتز منبعی برای شمار زیادی از فراورده‌های واسطه‌ای شد که پس از جداسازی و عمل آوردن آنها در رأس فهرست این مواد جای داده شدند. این فرصتی برای پیشرفت فن کاربرد کاتالیزورها بود - چیزی که به سود تکثیر روشهای کراکینگ و رفرمینگ هیدروکربنهای طبیعی تمام شد. سرانجام این کار، ارزیابی مجدد اهمیت شماری فراورده‌های استخراجی زغال‌سنگ، لینیت، تورب

و گاز را موجب شد. این مسأله مانند روشهای مستخرج از اختراعات به ثبت رسیده برگیوس در بسط قابل توجه تکنیکهای استخراج پتروشیمی مؤثر افتاد.

هیدروژندهی در فشار و کراکینگ: پیشرفت روشهای برگیوس بر پایه تجربه‌ای بود که در ۱۸۹۶ بوسیله برتو انجام گرفت. برتو در جریان این تجربه، توانست با گذرانیدن جریانی از هیدروژن بر روی زغال سنگ خرد شده، تعدادی مواد روغنی شکل به دست آورد. هرچند که نخستین اختراعات به ثبت رسیده تاریخ ۱۹۱۳ را بر خود دارند، همان‌گونه که گفتیم، پیشرفت این روش طولانیتر و دشوارتر از روش فیشر-ترویش بود. پس از پایان جنگ جهانی اول، در آلمان تا سال ۱۹۲۴ آزمایشها تجدید نشد و دو سال بعد به کارهای نیم صنعتی در لِنّا<sup>۱</sup> انجامید.

باین حال، اصل هیدروژندهی با فشار، در این دوره در کراکینگ فراورده‌های نفتی گسترش یافت. روش کراکینگ تقریباً از دورانهای نخست پالایش عملی می‌شد، زیرا مولکولهای هیدروکربنهای سنگین در گرما، کم و بیش مقداری تفکیک می‌شوند؛ گرچه در آن زمان در پی به دست آوردن اجزای سبکتر نبودند. در سال ۱۸۵۵ آقای سیلیمن<sup>۲</sup> در نیویورک مشاهده کرد که بخار داغ با دمای بیشتر از ۳۰۰ درجه چه آثاری دارد. کراکینگ از سال ۱۹۱۲ به طور پیگیری با روش برتن عملی می‌شد، و طبق آن، نفت در ظرفی در دمای ۴۰۰ تا ۴۵۰ درجه، تحت فشار ۵ تا ۶ اتمسفر قرار می‌گرفت.

طی سالهای ۲۰ کوششهای شمیمدانها و نفتگران روی کراکینگ تمرکز یافت، زیرا در برابر مشکل تازه‌ای قرار گرفته بودند: ساخت انبوه بنزینهای سبک برای موتورهای هواپیما و اتومبیل که جنگ جهانی اول کاربرد آن را نسبت به دهه نخست این سده، بسیار بالا برده بود. در این زمان تشویش بسیار زیادی درباره افزایش سریع مصرف سوخت ابراز می‌شد. طی شش سال، از ۱۹۱۷ تا ۱۹۲۳، این مصرف دو برابر شده بود. موتور دیزل نیز بنوبه خود شروع به کار در راه آهن و کشتی کرده بود. و بازار تازه‌ای برای نوع دیگری از سوخت، اما باز از نوع نفت گشوده بود. مازوت نیز برای گرم کردن دیگهای بخار به کار گرفته می‌شد. طبعاً مصرف لیزانه‌ها برای روغنکاری نیز با همین نسبت افزایش یافته بود.

در سالهای ۱۹۲۸ - ۱۹۲۹ ارزیابی می‌شد که منابع نفت ممالک متحده امریکا، اولین تولیدکننده و نیز مصرف‌کننده، طی بیست سال به پایان رسد و منابع کشورهای دیگر، طی شصت یا هشتاد سال دیگر. در چنین حال و هوایی بود که پژوهشهای فراوانی برای مصرف بهتر فراورده‌های نفت طبیعی انجام می‌گرفت.

کراکینگ کاتالیزوری که نوآوری پراهمیتی در عمل آوردن فراورده‌های پالاییده نفت بود در سال ۱۹۳۰ به مقیاس صنعتی رسید. این روش در اساس، پیش‌درآمد رواج سنتزهای کاتالیزوری در این صنعت بزرگ شیمیایی، پس از جنگ جهانی دوم بود. روشهای دیگری نیز در همین دوره به‌کار گرفته شدند که بویژه باید از رفورمینگ کاتالیزوری نام برد که هدف آن نه‌تنها شکستن زنجیر هیدروکربنهای مورد عمل، بلکه همچنین بهتر ساختن ساختار آن بود. تمامی این تحول، در وهله نخست، مدیون کوششهای پژوهندگان منفرد، نظیر آقایان یوجین هودری، راننده اتومبیلهای کورسی، که بعداً صنعتگر شد، و ا. آ. پرودم (\*) داروساز بود. اما نوآوریهای اولیه تا رسیدن به مرحله کاربرد صنعتی را شرکتهای نفت امریکا هدایت کردند.

تهیه فراورده‌های مصنوعی در همین ردیف جای دارند. دیده شد که روش فیشر - تروپش برای پاسخگویی به این تشویش به‌پیش برده شد. در مورد روشهای برگيوس نیز این ادعا درست است. اما در همان زمانی که روش هیدروژندهی با فشار زغال تکمیل می‌شد، در پی روشی برای اجرای کراکینگ فراورده‌های سنگین نفت با فشار زیاد هیدروژن بودند.

در واقع می‌دانستند که کراکینگ با فشار کمی بالا، سبب می‌شود که نه‌تنها هیدروکربنهای سبک به‌دست آید، بلکه هیدروژن گازی هم تولید می‌شود. در اینجا با تشکیل اولفینهای اشباع نشده‌ای سروکار داریم که تحت تأثیر گرما بسیار می‌شوند و فراورده‌های متراکمی ایجاد می‌کنند که تا ایجاد قیر و کک به‌پیش می‌روند. فراورده‌های اخیر در شکل رسوب جامد، مجراها را می‌بندند و کار را متوقف می‌سازند. برای از بین بردن ناراحتیهای مربوط به کارگسسته، آقای برگيوس پیشنهاد کرد که کراکینگ در زیر ۱۰۰ اتمسفر فشار هیدروژن انجام گیرد. روش کراکینگ هیدروژنی حدود سال ۱۹۳۰ به‌کار گرفته، اما تولید انبوه آن در سالهای ۱۹۵۰ عملی شد، یعنی زمانی که دقیقاً هیدروژندهی به زغال‌سنگ برای تهیه نفت سنتزی کنار گذاشته شده بود.

نفت سنتزی برگيوس: بویژه جنبه اخیر کاربرد اختراعات برگيوس در آلمان آینده درخشانی داشت. در طی سالهای پیش از جنگ و هم در دوران جنگ، آلمانیها تعداد دوازده کارخانه هیدروژندهی به زغال‌سنگ لینییت، و قطران برپا کردند. این کارخانه‌ها انواع سوختها را تهیه می‌کردند و ظرفیت کل آنها در سال ۱۹۴۴ به آنها امکان داد که حدود چهار میلیون تن نفت سنتزی بسازند که بیش از نصف مصرف این کشور در سال ۱۹۳۸ بود. پس از جنگ، تنها چند کارخانه کار خود را ادامه دادند، اما هیدروژندهی زغال‌سنگ میدان را برای هیدروژندهی به برشهای سنگین نفت، به دلایل اقتصادی، خالی گذاشت. عملیات اخیر که از سال ۱۹۳۰ در ممالک متحده امریکا انجام

می‌گرفت، پس از جنگ به دلایل اقتصادی دیگری غیر از آنچه در اروپا بود، کنار گذاشته شد. با این همه باید گفت که اجرای روشهای برگيوس، شیوه‌های هیدروژندهی تحت فشار را عمومیت بخشیده بود. این شیوه‌ها به پالایش هیدروژن دهنده نفت کشیده شد و این زمانی بود که یکی از روشهای متأخر تبدیل فراورده‌های نفت، رفورمینگ کاتالیزوری، به منبعی از هیدروژن ارزان تبدیل شده بود.

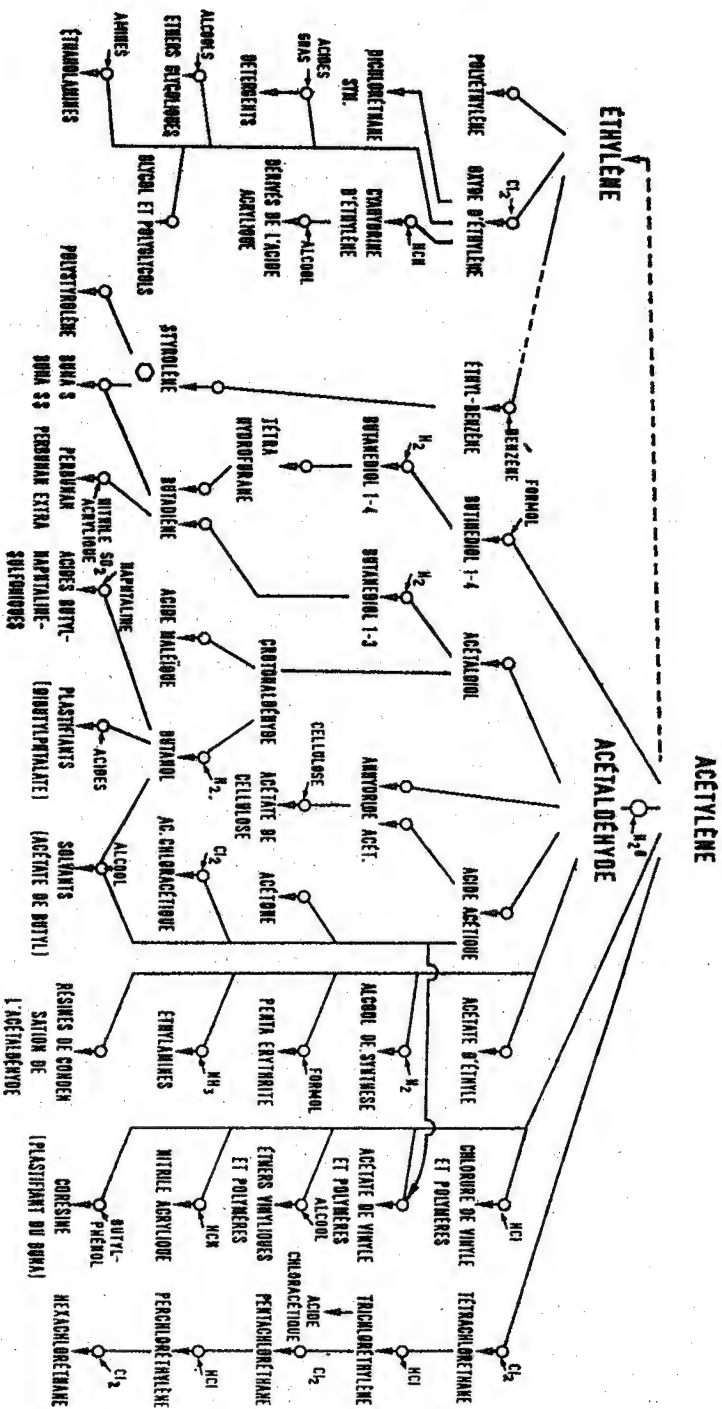
تداخل شاخه‌های صنعت: نمونه‌هایی که آمد می‌توانند تصویری از فرایندهایی ایجاد کنند که بر اساس آنها، صنعت بزرگ شیمیایی سنتزی به‌طور فزاینده‌ای به صنعت نفت، متصل می‌شوند و این تحول تکنیکی و اهمیت اقتصادی آن، بتدریج که موتورهای درونسوز در همه اشکال فعلی خود، جای ماشینهای بخار را می‌گیرند یا اینکه کاربردهای تازه‌ای می‌یابند، شتاب بیشتری می‌گیرد.

تکنیکهای شیمی نفت، علاوه بر تسلط بر بعضی عملیات صنعتی در فازهای گازی یا مایع، بسط کاربرد کاتالیزورها، چه برای واکنشهای شکننده زنجیرهای طولی، و چه به منظور بسپارش بر اساس ترکیبات سبک، تغییرات مهمی در منابع مواد خام مربوط به سنتزهای بزرگ صنعت شیمی ایجاد کردند. تا حدود سالهای ۵۰، استیلن نقطه آغاز کلی برای بیشترین تعداد این فراورده‌ها بود. اما روشهای کراکینگ فراورده‌های نفتی در این زمان، شروع به تولید گازهای واکنشی غنی از اولفینها و بویژه از اتیلن کردند. عملیات شست‌وشو یا جداسازی با روش لایند امکان تهیه مقدار روزافزون اتیلن را فراهم کردند و اتیلن نیز جای استیلن را به‌عنوان یک ماده خام پایه، گرفت. بدین ترتیب، بین صنایع بزرگ سنتزی و صنعت نفت، همگرایی فنی دیگری پدید آمد. هیدروکربنهای مایع شده را می‌شد به کارخانه‌های مصرف‌کننده تحویل داد، درحالی‌که واحدهای مصرف‌کننده اتیلن، لااقل جهت تهیه فراورده‌های بزرگ واسطه‌ای، می‌توانستند در جنب پالایشگاهها برپا شوند. همگرایی فنی با همگرایی تأسیساتی ادامه یافت. همان‌طور که دیگر نمی‌توان میان صنعت معدن و صنعت شیمی آلی مرز مشخصی برقرار کرد، مرز آشکاری هم بین صنایع شیمی آلی و صنایع نفت وجود ندارد.

این تداخل شاخه‌های بزرگ صنعت شیمی، نه‌تنها بر اثر مبادله پیوسته مواد خام و فراورده‌های ساختی و تکمیلی متقابل آنها مشخص می‌شود، بلکه همچنین بدلیل مفاهیم اساسی همه عملیات بزرگ تولیدی وجود دارد.

مهندسی شیمی: طرز تفکر نوینی که در عملیات شیمی صنعتی باید بررسی شود با صنعت سنتز نیترژن و اسید سولفوریک، در دو دهه نخستین همین سده، پدید آمد. در چنین موقعیتی،

جدول ۴. ردیف فراورده‌های ساخته شده از استیلن یا اتیلن





لزم به حساب آوردن، در مقیاس صنعتی، تراز ترمودینامیکی واکنشها، تکنیک محاسبه روشهای عملیاتی، دما، فشار، مدت و غیره - که تا آن زمان هرگز تحمیل نشده، اما از مدتها پیش پذیرفته شده بودند - خدمات گرانقدری در موقعیتهای فراوان دیگر انجام داده‌اند.

دینامیک واکنشها و طرح تجهیزاتی که واکنشها می‌بایست در آنها انجام گیرند، واکنشگاهها که بنوبه خود دستخوش قواعد تازه‌ای شده‌اند: محاسبه شکل، اندازه، ظرفیت و ساخت آنها؛ محاسبه ملزومات آنها از نظر مواد خام، سطوح پشتوانه کاتالیزورها، جریان فراورده‌های تکمیل شده، دستگاههای جابه‌جایی و بالاخره حمل و نقل آنها، به اطلاعات اساسی تبدیل شده‌اند.



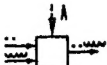


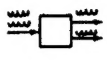
باید اطلاعات مربوط به وضع اقتصادی هم به اطلاعات فنی بالا افزوده شوند، که از آن جمله باید از هزینه تهیه مواد خام، سوختها، انرژی، تجهیزات، وسایل انبار کردن به‌طورکلی فراورده‌های تکمیل شده نام برد. این اطلاعات را باید با بررسی بازار، که سوددهی تأسیسات را معین می‌سازد و مقدار مصرف با در نظر گرفتن شرایط جریان کالا، تکمیل کرد.

همه اینها، فی‌نفسه مسایل تازه‌ای نبودند. می‌توان ادعا کرد که آنها سرنوشت همه ساختهای شیمیایی را از اوایل سده نوزدهم تعیین کرده‌اند - دورانی که صنعت بزرگ شیمی با ایجاد دستگاههای بیش از پیش سنگین و بسیار گوناگون و با تولید کالاهای مصرفی برای بازاری که پهنه آن هر روز گسترده‌تر می‌شد، خود را برپا داشته است. این مشکلات طی مدتها پیش از یک سده، در سایه کاردانی و تجربیات حرفه‌ای ما نوافکتورداران، جملگی به‌طور تجربی حل شدند - گرچه حل شماری از آنها، از همان آغاز دوره‌ای که ساخت رنگ‌های مصنوعی در حال تشکیل شاخه‌ای از صنایع سنگین بود در گرو روشهای پیشرفته‌تری از بررسی بود.

بتدریج که تحول فرایندها و ساختها، آهنگ شتابنده‌ای یافت، کم‌کم نیاز به پذیرش روشهای کلی طرح و اجرا احساس شد. این مرحله در طی سالهای ۲۰ و ۳۰ این سده به کمال رسید. مدیران مؤسسات، مهندسان و تکنسین‌ها از صنایع دیگر و بویژه از صنایع ماشین‌سازی، که مجموعه‌ای از همه‌گونه فعالیتها از مدتها پیش در آنها تمرکز یافته است، سرمشق گرفتند. بدین ترتیب، مفهوم مهندسی شیمی در ۱۹۳۱ به توسط آقایان و.ا. بجر<sup>۱</sup> و جوزف مک‌کیب<sup>۲</sup> در ممالک متحده امریکا، و در ۱۹۳۴ به توسط ا. اویکن<sup>۳</sup> و م. یاکوب<sup>۴</sup> در آلمان فرمولبندی شد، گرچه اصطلاحاتی که در زبانهای زنده به‌کار گرفته شدند، جملگی بر مفهوم دقیقاً یکسانی دلالت نمی‌کردند.

هدف این رشته، سیستمی کردن توضیح روشهای کار و به‌کار بردن این سیستم به‌جای کاتالوک روشها و تجهیزاتی بود که تا آن زمان در کتابهای شیمی صنعتی ضبط می‌شد. این سیستمی کردن

جدول ۷. نمونه‌هایی از نشانه‌گذاری در مهندسی شیمی

	تعلیق		در خلأ	ساخت
	انحلال		تولید با یا حذف گرما	انباشت
	خرد کردن		تولید با نگهداری موقتی	
	جداسازی پیوسته		یک جزء مثلاً با کاتالیز، جذب و غیره	

با رده‌بندی جدید اطلاعات مورد نظر، عملیات اساسی با مشخصات فیزیکی، عملیات اساسی با مشخصات شیمیایی، مشخص کردن آن واحدهای عملیاتی که اصول آنها در انواع زیادی از کاربردها تغییر نمی‌کنند شکل می‌گیرد. همچنین مهندسی شیمی برای تعمیم روشهای بررسی بمنظور خلق یا اجرای روشهای نظیر تثبیت شرایط عملیات بر پایه محاسبه واکنشها یا قابل فهم کردن تأسیسات خدمت می‌کند. زبان و نشانه‌های تازه‌ای ساخته شده‌اند که وسایل بیان مهندسی شیمی را تشکیل می‌دهند.

در طی سالهای ۵۰ و ۶۰ بود که این رشته تازه پدید آمد و پایه‌های اساسی آن کامل شد. تغییرات طرز تفکر و کارهایی که در این برهه از زمان اجرا شده‌اند از نظر تاریخ صنعت شیمی، محققاً همان اهمیت را دارند که دانش شیمی در نیمه دوم سده هجدهم واجد آن بود.

### کتاب‌شناسی بخش سوم

در باره تاریخ معاصر صنعت شیمی، جز کتاب آقای شرود تیلور، کتاب دیگری نوشته نشده است. بررسی این تاریخ، تنها با مقایسه کتابهای عمومی شیمی صنعتی و کتابهای تخصصی دوره‌های مختلف امکان دارد. در فهرست زیر گزیده‌ای از عناوین اصلی، از میان انبوهی از نوشته‌های دیگر آورده شده است. اکثر این عناوین، فقط در کتابخانه‌های عمومی یافت می‌شوند. طبیعی است که باید در زبانهای غیرفرانسوی هم، کتابهایی هم‌ارز آنها نوشته شده باشند. در زبان فرانسه، کتابهای معتبری که زیر نظر آقایان پل پاسکال و ویکتور گرینار تهیه شده‌اند منابع تاریخی دقیق و نسبتاً کاملی هستند، زیرا درباره هر موضوع، کتاب‌شناسی ترتیب داده شده برای آن را می‌توان

کامل دانست. کتابهای آلمانی که زیر نظر آقایان ویناکر و کوشلر تهیه شده‌اند نیز با کتاب‌شناسی کاملی مجهز می‌باشند که از نظر تاریخی بسیار مفید هستند؛ گرچه به کمال کتابهای تألیفی آقایان پاسکال و گرینار دست نیافته‌اند.

Exception faite de l'ouvrage de Sherwood Taylor il n'existe pas d'histoire de l'industrie chimique pour la période contemporaine. Celle-ci ne peut être étudiée que par la comparaison du contenu des traités généraux de chimie industrielle et d'ouvrages spécialisés des différentes époques. On trouvera ci-dessous un choix des principaux titres qui ont été utilisés parmi un très grand nombre d'autres. La majeure partie d'entre eux n'existe plus que dans les bibliothèques.

Naturellement on peut trouver l'équivalent dans les autres langues que le français. En langue française, les grands traités dirigés par Paul Pascal et Victor Grignard constituent des sources historiques exactes et relativement complètes car sur chaque sujet la bibliographie a été effectuée d'une façon que l'on peut considérer comme exhaustive. Mais la consultation en est laborieuse. Le traité allemand dirigé par Winnacker et Kùchler comprend également une abondante bibliographie qui peut rendre de grands services au point de vue historique, bien qu'elle ne soit pas aussi complète que celles des deux ouvrages collectifs français de Pascal et de Grignard.

BAUD (P.), *Chimie industrielle*, 1922.

BELTZER (Francis J. G.), *La chimie industrielle moderne*, 2 vol., 1909-1911.

CHAMPETIER (G.), *Les molécules géantes*, 1948.

CLAUDE (G.), *L'air liquide*, 1909 et 1926.

DELORME (J.), *Toute l'industrie des matières plastiques*, 3 vol., 1937.

— *Le présent et l'avenir des matières plastiques*, 1954.

FAUQUET (L. G.), *Histoire de la rayonne et des textiles synthétiques*, 1960.

GRIGNARD (V.), *Traité de chimie organique*, 23 vol., 1935-1954.

HACKSPILL (L.), *L'azote*, 1922.

LEFÈVRE (J.), *La liquéfaction des gaz et ses applications*, 1900.

LUNGE (G.) et NAVILLE (J.), *Traité de la fabrication de la soude*, 3 vol., trad. franç., 1879-1881.

MAILHE (A.), *Les combustibles liquides artificiels*, 1929.

MARCHENA (R. E. de), *Les machines frigorifiques à air*, 1901.

— *Les machines frigorifiques à gaz liquéfiables*, 1901.

MINET (Ad.), *Traité théorique et pratique de l'électrochimie*, 1900.

PASCAL (P.), *Traité de chimie minérale*, 13 vol., 1931-1934.

PAYEN (A.), *Précis de chimie industrielle*, 3 vol., 1878.

RANDOIN (L.) et SIMONNET (H.), *Les vitamines*, 1932.

TAYLOR (S. F.), *A History of Industrial Chemistry*, 1957.

WAGNER (R.), FISCHER (F.), GAUTHIER (L.), *Traité de chimie industrielle*, 2 vol., trad. franç., 1901-1903.

بکتابشناسی عمومی پایان مجلد پنجم هم مراجعه شود.